

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Disertační práce

Efektivní strategie při soustružení

Effective strategies during turning

Student:

Ing. Zuzana Sadílková

Vedoucí disertační práce:

prof. Dr. Ing. Josef Brychta

Studijní obor:

2303V002 Strojírenská technologie

Ostrava 2015

Poděkování

Děkuji firmě Pramet Tools, s.r.o. a firmě ISCAR ČR s.r.o. za poskytnutí rezných nástrojů.

Dále bych chtěla poděkovat konzultantům a všem z katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie, hlavně pak mému školiteli prof. Dr. Ing. Josefu Brychtovi, kteří mi přispěli radou a povzbuzením.

Chtěla bych také poděkovat své rodině, mým rodičům a přátelům, kteří mě po celou dobu mého studia morálně, finančně a materiálově podporovali a bez kterých by tato práce jistě nevznikla.

V Ostravě, dne

.....

podpis

Anotace disertační práce

SADÍLKOVÁ, Zuzana. Efektivní strategie při soustružení. Ostrava: Katedra obrábění a montáže a strojírenské metrologie, Fakulta strojní, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2015, 101 s., 5 příloh. Disertační práce, vedoucí: prof. Dr. Ing. Josef Brychta.

Předložená disertační práce se zabývá problematikou zvyšováním efektivnosti obrábění u středně hrubovacích cyklů operace soustružení. Popisuje a navrhuje možnosti použití efektivních strategií a jejich aplikaci při programování CNC soustružnických center. Jedná se o návrh hrubovacích cyklů s použitím proměnné hloubky řezu, které umožní zvýšit trvanlivost řezného nástroje a tím i zvýšit efektivnost při soustružení.

Navrhované výzkumy pro disertační práci by měly za pomoci experimentálních prací, měření sil řezání a opotřebení řezné části nástroje, zhodnotit nasazení navrhovaných řešení do praxe. Disertační práce přináší nové poznatky do oblasti teoretických rozborů soustružení s proměnnou hloubkou řezu.

Práce ukazuje a potvrzuje velký význam zkoumání této problematiky jak z pohledu teoretických výzkumů, které jsou základem pro praktické uplatnění, tak z pohledu okamžitého praktického ověření v praxi.

Disertační práce popisuje a navrhuje hrubovací cykly: úbytek záběru, soustružení vytvářením kuželové plochy, soustružení nepřímkovými metodami.

Práce porovnává standartní strategii obrábění a nově navrhovanou strategii s vytvářením kuželové plochy (tj. strategie s proměnnou hloubkou řezu).

Nedílnou a velmi přínosnou součástí experimentálních prací je podrobný rozbor stavu opotřebení břitu v závislosti na čase obrábění. Změřené jednotlivé složky síly řezání jsou podrobně analyzovány a vysokou měrou přispívají k pochopení řezného procesu s proměnnou hloubkou řezu.

Disertační práce předkládá varianty začlenění výsledků výzkumu do pracovního postupu programování CNC obráběcího stroje. Práce tak přispívá k praktickému uplatnění výsledků výzkumu. Ve vědeckovýzkumné oblasti ukazuje směr vývoje CAM systémů. Navrhuje možné varianty implementace výzkumu do 2osých soustružnických modulů CAM systémů.

Annotation of Diploma Thesis

SADÍLKOVÁ, Zuzana. Effective strategies during turning. Ostrava: Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, Faculty of Mechanical Engineering VŠB-Technical University of Ostrava, 2015, 101 p. 5 s. Ph.D. Thesis, head: prof. Dr. Ing. Josef Brychta.

The purpose of this Ph.D. thesis is to investigate the problems with increasing the efficiency machining for medium roughing operation turning cycles. Ph.D thesis describes and suggests the possibility of using effective strategies and their application in programming CNC turning centers. Suggested roughing cycles with the use of variable depth of cut will ensure increasing the durability of the cutting tool and the efficiency during turning.

The proposed research for the Ph.D. thesis is an experimental work - measuring cutting forces and monitoring of the tool wear on the cutting edge. Ph.D. thesis will provide new insights in theoretical analyzes in turning with the use of variable depth of cut.

Work demonstrates and confirms the great value of studying this issue within the theoretical research, which are the basis for practical application and for an immediate practical testing.

Ph.D. thesis describes and proposes roughing cycles: decreased cut, turning with the creation of the conical surface, turning with nonlinear methods.

This work compares standard machining strategy and newly proposed strategy with the creation of the conical surface (ie. a strategy with variable depth of cut).

Important part of experimental work is a detailed analysis of the tool wear on the cutting edge versus time. Individual components of cutting forces are scrutinized and results helping us to understand the cutting process with a variable cut depth.

Ph.D. thesis presents variations of integration into the workflow for programming CNC machine tools. In scientific research area shows the trend CAM systems. It suggests possible options of implementation this research into 2-axis turning modules CAM systems.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK.....	3
1. ÚVOD.....	5
2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	7
3. ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU DANÉ PROBLEMATIKY.....	8
3.1 2osé soustružení.....	8
3.1.1 Základní nabídky obráběcích cyklů v CAM systému pro 2osého soustružení.	8
3.1.2 Pravoúhlé soustružení	10
3.1.3 Soustružení na profil.....	10
3.1.4 Soustružení kapes	11
3.1.5 Hrubovací soustružení	11
3.2 Možnosti zvyšování efektivnosti soustružení	14
3.3 Výhody využití pokročilých řídicích systémů	18
4. NÁVRH EFEKTIVNÍCH HRUBOVACÍCH CYKLŮ SOUSTRUŽENÍ	21
4.1 Hrubovací cyklus „úbytek záběru“	21
4.2 Hrubování s vytvářením kuželové plochy	22
4.3 Hrubování nepřímkovými metodami	22
4.4 Možnosti programování efektivních strategií	23
5. MĚŘENÍ SIL ŘEZÁNÍ PŘI SOUSTRUŽENÍ	26
5.1 Měření sil	27
5.1.1 Přímé měření sil	27
5.1.2 Nepřímé měření sil.....	30
6. OPOTŘEBENÍ BŘITU ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ	32
6.1 Opotřebením nástroje ze slinutého karbidu	33
6.2 Opotřebením při proměnné hloubce řezu	34
7. PRAKTICKÁ REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍCH ČÁSTÍ.....	36
7.1 Stroje a zařízení použité při výzkumu	36
7.2 Obráběný materiál.....	41
7.2.1 Praktické využití oceli 1.2379 – 19 573	42

7.3 Použité řezné nástroje	43
7.4 Programování drah nástroje	45
8. POSTUP EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI.....	46
9. OPOTŘEBENÍ ŘEZNÉHO NÁSTROJE PŘI PODÉLNÉM SOUSTRUŽENÍ S KONSTANTNÍ A PROMĚNNOU HLOUBKOU ŘEZU	50
9.1 Rozbor opotřebení u materiálu 19 573 po tepelné úpravě kalení	50
9.2 Rozbor opotřebení u nekaleného materiálu 19 573	52
9.3 Celkové zhodnocení opotřebení při obrábění s různými strategiemi obrábění	58
10. SÍLY ŘEZÁNÍ PŘI PODÉLNÉM SOUSTRUŽENÍ S KONSTANTNÍ A PROMĚNNOU HLOUBKOU ŘEZU	59
10.1 Analýza sil řezání v průběhu jednoho záběru nástroje	62
10.2 Analýza sil řezání v závislosti na opotřebení nástroje	74
10.3 Závěrečná analýza sil řezání	84
11. ZÁVĚRY	87
11.1 Přínos pro využití v praxi.....	89
11.2 Vědecký a společenský význam pro obor.....	90
11.3 Cíle pro navazující výzkumy	91
12. SUMMARY	92
12.1. Contribution for practical usage	93
12.2. Scientific Contribution.....	93
LITERATURA.....	94
VLASTNÍ PUBLIKACE AUTORA.....	99
Autorská díla vytvořené pro průmysl	100
SEZNAM PŘÍLOH.....	101

Seznam použitých symbolů a značek

<i>Značení</i>	<i>Význam</i>	<i>Jednotka</i>
CAD	počítačem podporovaný návrh	-
CAM	počítačem podporovaná výroba	-
CNC	počítačem číslicově řízený stroj	-
CBN	kubický nitrid boru	-
CVD	chemická metoda nanášení povlaku	-
HB	tvrdost dle Brinella	-
HRC	tvrdost dle Vickerse	-
NC	čísllicově řízený stroj	-
SK	slinutý karbid	-
VBD	vyměnitelná břitová destička	-
D	průměr	[mm]
f_{ot}	posuv na otáčku	[mm]
f_{min}	posuv za minutu	[m·min ⁻¹]
F	řezná síla	[N]
F_t	třecí síla	[N]
F_c	řezná složka síly řezání (tangenciální složka síly řezání)	[N]
F_p	pasivní složka síly řezání	[N]
F_f	posuvová složka síly řezání	[N]
F_x	složka síly řezání ve směru x	[N]
F_y	složka síly řezání ve směru y	[N]
F_z	složka síly řezání ve směru z	[N]
k	měrný řezný odpor	[N·mm ⁻²]
KB	šířka žlábků	[mm]
KT	hloubka žlábků	[mm]
l	intenzita opotřebení	[mm·min ⁻¹]
L	dráha nástroje ve směru posuvu	[mm]
l_n	délka vyložení nástroje	[mm]
PVD	fyzikální metoda nanášení povlaku	-

n	otáčky vřetene	$[\text{min}^{-1}]$
N	počet cyklů	$[-]$
ts	strojní čas	$[\text{s}]$
ts _(vst c)	celkový vstupní čas (nájezdu do řezu)	$[\text{s}]$
T	trvanlivost nástroje	$[\text{min}]$
Q	množství odebraného materiálu	$[\text{cm}^3]$
R	řezný odpor	$[\text{N}]$
RO	rychlořezná ocel	$[-]$
ŘK	řezná keramika	$[-]$
SK	slinutý karbid	$[-]$
VBD	vyměnitelná břitová destička	$[-]$
VB	opotřebení na hřbetu	$[\text{mm}]$
VB _{max}	maximální opotřebení na hřbetu	$[\text{mm}]$
VB _N	opotřebení ve formě vrubu	$[\text{mm}]$
VB _{krit}	kritické opotřebení nástroje	$[\text{mm}]$
VR	radiální opotřebení nástroje	$[\text{mm}]$
a	tloušťka odebírané vrstvy	$[\text{mm}]$
a _p	hloubka řezu	$[\text{mm}]$
v _f	rychlost posuvu	$[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$
v _c	řezná rychlost	$[\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$
v _t	rychlost odcházející třísky	$[\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}]$
γ _f	úhel čela v rovině boční	$[\text{°}]$
γ _n	úhel čela v rovině normálové	$[\text{°}]$
κ _r	úhel nastavení hlavního ostří	$[\text{°}]$
r _ε	nástrojový poloměr špičky	$[\text{°}]$
r _n	poloměr zaoblení ostří	$[\text{°}]$
s	tloušťka vyměnitelné břitové destičky	$[\text{mm}]$
ε	intenzita plastické deformace	$[-]$
ε _r	úhel špičky nástroje	$[\text{°}]$

1. ÚVOD

V době kdy se nacházíme na počátku nového století a požadavky na zvýšení produktivity a dosažení technické a výrobní dokonalosti jsou stále více aktuální, již nestačí pouze reagovat na potřeby trhu, postupným zvyšováním objemu výroby spotřebního zboží v důsledku nových, mnohem produktivnějších výrobních technologií. Dnešní výrobci musí vzít v potaz stále se zhoršující se a komplikující se odbytové možnosti na světových trzích, přestože se celosvětová ekonomika dostala z recese. Firmy, které včas nezachytí nebo podcení současnou situaci a směr vývoje, brzy začnou ztrácet své tržní pozice a konkurenceschopnost, a budou muset čelit ekonomicko-sociálním problémům. Je nutné však podotknout, že právě státy širší světové špičky (USA, Japonsko, EU a některé přidružené státy) současné poměry správně vyhodnotily a investovaly a stále investují nemalé částky do vývoje a výzkumu v dané oblasti.

Je nutné mít na zřeteli, že v kontrastu prvního pohledu se snižuje podíl obráběcích technologií ve prospěch beztržiskových ve výrobě předmětů denní spotřeby, avšak roste podíl ve sféře výroby strojů, nástrojů, výrobků leteckého i automobilového průmyslu a ty, jak je známo jsou srdcem světového průmyslového rozvoje. Z tohoto vyplývá, že tendence činností výrobců je jasná, zvýšit produktivitu a odstranit veškeré ztráty.

V dnešní době nutí trh jednotlivé firmy a společnosti uvádět svoje výrobky rychleji na trh, ve vyšší výrobní kvalitě a za nižší cenu. Vlivem silného nátlaku konkurence dochází k neustálé inovaci výrobků. Využívání moderních technologií napomáhá splňovat vyšší nároky na zvýšenou kvalitu celkové výroby součástí. Při vývoji výrobků jsou kladeny vyšší požadavky nejen na nové výrobní technologie ale také na kvalifikaci technologů a konstruktérů, kteří s těmito novými softwarovými produkty přicházejí do styku. [22]

Práci inženýrů, konstruktérů a techniků si dnes prakticky ve strojírenských firmách nelze představit bez použití CAD/CAM systémů. Kvalitní CAD/CAM systémy jsou jednou ze zásadních podmínek pro kvalitní a efektivní funkci konstrukce a technologickou přípravu výroby. Jen samotné zařazení počítačem řízených strojů do výroby nestačí. Důležitou a nutnou složkou je kvalifikovaná obsluha těchto strojů, ale i kvalifikovaní programátoři, kteří jsou schopni připravit odpovídající kvalitní programy pro obráběcí stroje. Tato disertační práce se mimo jiné zabývá také návrhy řešení pro pokročilé CAD CAM systémy a přináší některá doporučení pro programátory a technologu.

Dnešní moderní NC a CNC stroje jsou schopny nahradit a také postupně vytlačují téměř všechny starší konvenční obráběcí stroje, které se i dnes ještě používají a spolehlivě plní svou funkci ve výrobním procesu [4]. K těmto novým strojům neodmyslitelně patří i CAD/CAM systémy, pomocí nichž je možno zjednodušit a urychlit složitou činnost programování výroby součástí.

CAD/CAM systémy se používají s výhodou tam, kde pro složitost tvarů součástí by bylo časově náročné použít klasické obráběcí stroje nebo tam kde by nebylo možné jiným způsobem součást vyrobit.

V souvislosti s automatizováním výrobních procesů, mimo jiné i řezných režimů, se očekává od nových nástrojových materiálů zvýšená trvanlivost činných ploch, stabilní přesnost, vyšší tepelná odolnost a delší životnost. [XI]

Tato disertační práce se zabývá právě zvyšováním trvanlivosti řezného nástroje a to pomocí nových hrubovacích cyklů, které tato práce navrhuje a testuje. [XI]

Máme-li dosáhnout co nejlepší hospodárnosti, měli bychom mít celkový přehled o kompletním průběhu výroby, včetně možností její optimalizace a také detailní znalosti o všech podrobnostech existujících výrobních postupů. To znamená, zahrnout do úvah o hospodárnosti i břit nástroje a jeho výkonnost již ve stádiu plánování investic, nebo při změně výrobní technologie. [1]

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce si klade za hlavní cíl zefektivnit výrobu rotačních typů součástí. Prostředkem je navrhnutí nové technologie výroby a prokázání výhod navrhovaných řešení, včetně vědeckého zdůvodnění a praktické aplikace. Cílem je nejen zmapovat a zhodnotit problematiku navrhnuté technologie soustružení, ale také provedení série experimentů, které by měly potvrdit její zavedení do praxe.

Snahou je rozšíření výsledků disertační práce do širšího povědomí společností zabývajících se výrobou hřídelových typů součástí.

Cíle disertační práce jsou:

- Navržení efektivních strategií soustružení.
- Provedení experimentů při soustružení s konstantní a proměnnou hloubkou řezu.
- Porovnat stávající strategie a navrhované v těchto oblastech:
 - měření a vyhodnocení sil řezání se zaměřením na velikost, orientaci, rozkmit a poměr jednotlivých složek sil řezání,
 - nalezení energeticky nejméně náročné dráhy nástroje,
 - stanovení průběhu a velikosti opotřebení nástroje.
- Rozšíření experimentů do širšího povědomí společností pracujících v daném oboru.
- Stanovení efektivní strategie obrábění.
- Návrh vhodného způsobu programování efektivní strategie obrábění (dráhy nástroje).
- Zmapovat a navrhnout nejvhodnější typy řezných nástrojů v souvislosti s vhodností uplatnění pro navrhované technologie.
- Racionalizace výroby hřídelových součástí.

3. ANALÝZA SOUČASNÉHO STAVU DANÉ PROBLEMATIKY

Tato kapitola uvádí současný stav řešení dané problematiky se zaměřením na rozbor vybraných obráběcích cyklů 2osého soustružení.

3.1 2osé soustružení

Při 2osém soustružení jsou používány soustruhy s řízením ve dvou osách (většinou zx) s jednou nástrojovou hlavou.

3.1.1 Základní nabídky obráběcích cyklů v CAM systému pro 2osého soustružení

Základní typy používaných nabídek obráběcích cyklů a operačních úseků pro 2osé soustružení jsou [4]:

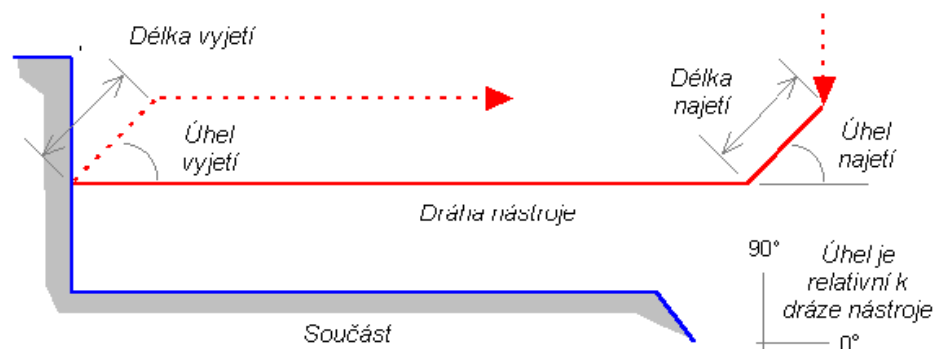
- pravoúhlé soustružení,
- hrubovací soustružení,
- soustružení na profil,
- soustružení zápichů,
- soustružení kapes,
- soustružení závitů,
- obrábění děr,
- upichování,
- zbytkové soustružení,
- ruční vkládání pohybu nástroje.

Následně budou popsány vybrané možnosti hrubovacích cyklů soustružení. Mezi základní zadávané údaje v operačních listech jednotlivých používaných nabídek patří [4]:

- zadání, nebo úprava řezných podmínek, které systém sám vybral z databáze,
- hloubka záběrů (hloubka záběrů v % řezné hrany, úbytek záběrů, nastavení neměnné hloubky záběru),
- najetí do záběru a vyjetí ze záběru (úhel, délka, poloměr apod.),
- prodleva otáček vřetene,
- přejezdy mezi záběry, atd.

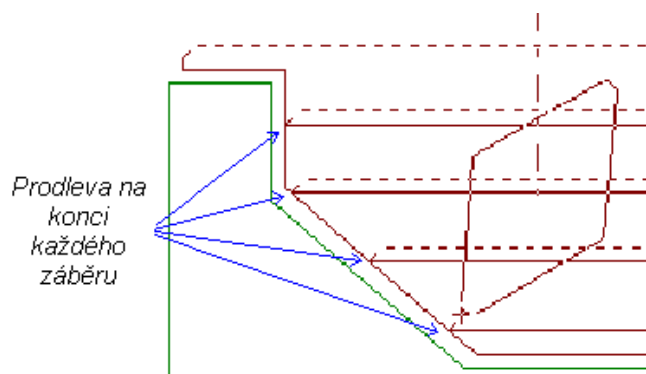
Úbytek záběrů je hodnota, o kterou se zmenšuje každý následující záběr. Úbytek záběrů se používá při soustružení dlouhých hřídelí, kde se tuhost součásti snižuje postupným odebráním materiálu.

Najetí a vyjetí nože ze záběru může být přidáno před počátek každého nájezdu a je vykonáváno pracovním posuvem. Zpětný pohyb je vykonáván rychloposuvem.



Obr. 3.1 Najetí a vyjetí nože ze záběru [54]

Prodleva otáček vřetene zabraňuje nedokončení řezu. Při soustružení obrobků větších rozměru může dojít k nedokončení řezu při odjezdu nástroje rychloposuvem dříve, než dokončení otáčky vřetene. Tomu lze zabránit prodlevou na konci každého hrubovacího záběru.



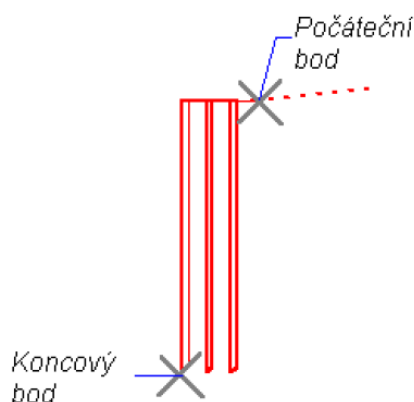
Obr. 3.2 Prodleva na konci každého záběru [54]

3.1.2 Pravoúhlé soustružení

Pravoúhlé soustružení v radiálním nebo axiálním směru, lze rozdělit na tyto způsoby:

- čelní (podél osy X),
- podélné (podél osy Z),
- pod zadaným úhlem vůči ose Z.

Obrábět lze od koníka ke sklíčidlu nebo obráceně. Pro hrubování lze nastavit parametry tloušťky třísky, způsobů příjezdů/odjezdů, rozdílné posuvy včetně posuvu do vybrání, způsobů tzv. začistění, a to buď po každé třísce nebo po hrubování najednou.



Obr. 3.3 Způsob zadání místa úběru materiálu [54]

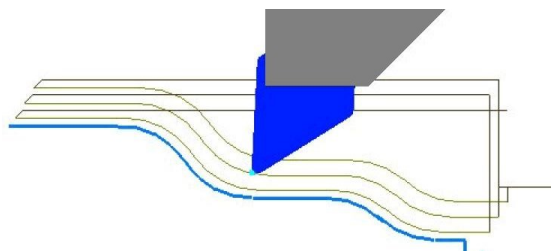
Pravoúhlé soustružení může být také označeno jako obdélníkové cykly. V některých systémech označovaných také jako **Hrubování**, což je vlastně odebrání materiálu mezi polotovarem a dílcem s požadovanými přídávky [4].

3.1.3 Soustružení na profil

Soustružení na profil znamená hrubování a dokončování profilu obrobku dle zadaného profilu (obrysu tvaru součásti).

V některých systémech označovaných také jako **dokončování**, což je vlastně dokončení zvolené části dílce s přídávkem nebo načisto. Cyklus umožňuje obrobení tvaru podle zvoleného nástroje tak, že odebere materiál pouze tam, kde to dovoluje geometrie

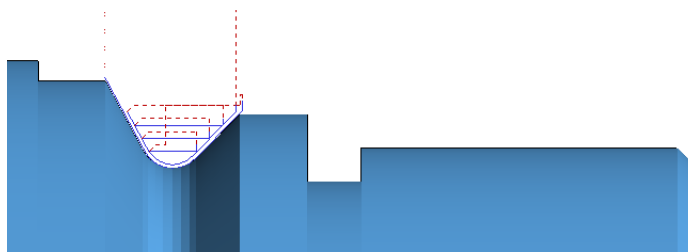
použitého nástroje. Dokončovat lze všemi tvary nožů včetně zapichovacích.



Obr. 3.4 Soustružení na profil - dráha nástroje

3.1.4 Soustružení kapes

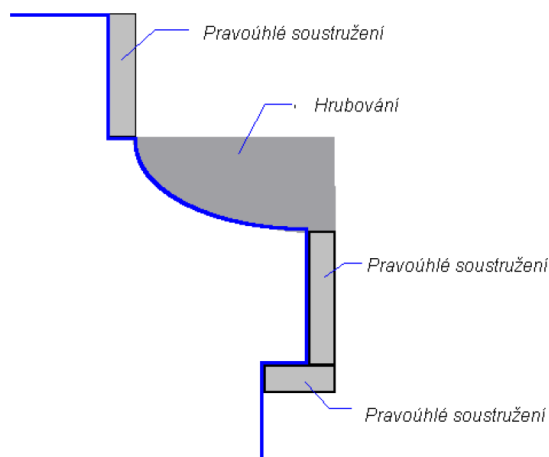
Soustružení kapes je speciální nabídka pro hrubování a dokončování tvaru kapsy. V některých systémech není k dispozici, a proto se pro soustružení různých tvarů kapes využije nabídka hrubování a následně dokončování, nebo soustružení profilu.



Obr. 3.5 Soustružení kapes - dráha nástroje

3.1.5 Hrubovací soustružení

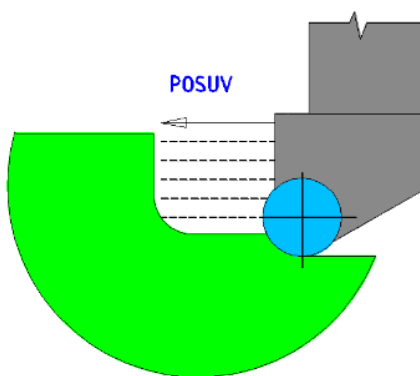
Hrubovací soustružení se používá k odebírání materiálu z nepravidelné oblasti obrobku. Tato nepravidelná oblast může být vytvořena např. jinou technologií: odléváním, kovááním, nebo tepelnou úpravou. Hrubování lze ohraničovat souřadnicemi (X, Z), geometrickými prvky nebo oknem [4].



Obr. 3.6 Hrubovací a pravoúhlé soustružení [54]

V současné době se při hrubovacím soustružení, kdy je nutno odebrat větší objem materiálu, téměř vždy aplikuje konstantní hloubka řezu a_p . Jedná se především o programovatelný cyklus podélného soustružení, ať už se jedná o cyklus pravoúhlého soustružení, nebo o hrubovací soustružení pro odebírání materiálu z nepravidelné oblasti obrobku.

Následný náčrtek zobrazuje běžně používaný hrubovací cyklus. V tomto hrubovacím cyklu se obrábí konstantní hloubkou řezu, je vidět na Obr. 3.7. Průběh obrábění má za následek převažující opotřebení destičky pouze v jednom místě řezného břitu a to většinou ve vzdálenosti od špičky nástroje, která je ekvivalentní hloubce řezu (při použití řezné VBD - slinutý karbid).



Obr. 3.7 Hrubovací cyklus s konstantní hloubkou řezu [54]

Praktická oblast uplatnění disertační práce je výroba rotačních obrobků (vnějších, vnitřních i případně čelních ploch) v různých odvětvích strojího průmyslu.

V tuzemské literatuře nejsou navrhované strategie popisovány. Důvodem může být fakt, že obecně uváděný podíl nákladů na nástroje připadajícího z celku procesu výroby se pohybuje jen okolo 4% a navíc při optimalizaci řezných podmínek je hloubka řezu řazena za řeznou rychlost a posuv nástroje, které se největší mírou podílejí na trvanlivost nástroje [7], [16]. Proto snaha o zefektivnění procesu obrábění touto cestou se může zdát zdlouhavá a zbytečná. Avšak prvotní práce autorky ukazují správný směr cesty zvyšování efektivnosti obrábění zvyšováním životnosti nástroje pomocí navrhovaných cyklů.

Výzkumnou oblast této problematiky pokrývají výhradně zahraniční autoři [45] [46] [47] [48]. Z nich lze jmenovat například následující: Sandvik Coromant [51] a SECO tools [52].

Jednou z největších nevýhod cyklů soustružení s konstantní hloubkou řezu je nepříznivé rozložení opotřebení podél břitu nástroje. Tomu lze efektně zabránit použitím navrhnutých cyklů soustružení, uvedených v následující kapitole.

Problematika soustružení s proměnnou hloubkou řezu je v disertační práci mapována a popisována z různých stran profesního odborného pohledu. Při návrhu konkrétní strategie soustružení a řezných podmínek je nutné z hlediska procesu obrábění zvažovat především tyto základní aspekty:

- trvanlivost a životnost obráběcích nástrojů,
- čas přípravy NC programu,
- celkový čas výroby trvající od samotného návrhu součásti, až po jeho konečné dokončení,
- stabilitu řezného procesu,
- geometrickou přesnost nástroje,
- zachování geometrické přesnosti obrobenej plochy,
- zachování kvality obrobenej povrchu – parametry struktury povrchu, změny struktury,
- ekonomické aspekty, jako jsou výrobní náklady a celková ekonomická efektivnost obrábění,
- provozní spolehlivost, atd..

Vytvoření hrubovacího cyklu lze provést následujícími způsoby, které uvádí jednu z možností rozdělení způsobu programování číslicově řízených obráběcích strojů [4].

- Online – programování přímo na CNC stroji, dílenské programování (SFP – *Shop Floor Programing*).
- Offline – tvorba NC programu mimo řídicí systém:
 - ručně (psaní pomocí ISO kódu),
 - pomocí CAM systému (CAD/CAM systému).

Níže je zobrazen příklad ručního programování hrubovacího cyklu podélného soustružení s konstantní hloubkou řezu – funkce G64. Tato věta NC kódu, která vyjadřuje zápis hrubovacího cyklu při soustružení s uvedením těchto parametrů: podélné hrubování polotovaru na průměr (X) do vzdálenosti (Z) s hloubkou třísky (U) posuvem (F).

Např. N 30 G 64 X1840 Z-4960 F80 U100

Další možností je programovat zmiňovaný cyklus v řídicím systému stroje, např. pro WINNC SINUMERIK 810 D / 840 D uvádí následující obrázek.

Cyklus	Parametr	Definice, funkce	Popis
CYCLE 95 hrubovací cyklus	1 NPP	jméno podprogramu	VARI 1, 5, 9 podélné vnější
	2 MID	max. hloubka přísuvu	VARI 3, 7, 11 podélné vnitřní
	3 FALZ	přídavek na opracování v Z	VARI 2, 6, 10 příčné vnější
	4 FALX	přídavek na opracování v X	VARI 4, 8, 12 příčné vnitřní
	5 FAL	přídavek na konturu	
	6 FF1	posuv pro hrubování	
	7 FF2	posuv pro sjetí za nákrůžkem	
	8 FF3	posuv pro obrábění načisto	
	9 VARI	způsob obrábění	
	10 DT	časová prodleva pro zlomení třísky	
	11 DAM	dráha pojezdu pro zlomení třísky	

Zadat jen FAL nebo FALX+FALZ

Name des Konturunterprogramms	
NPP	KONTUR
Bearbeitung	Schruppen
Auswahl	längs
Auswahl	außen
Zustelltiefe	MID 3.000
Schlichtaufm.	FALZ 0.500
Schlichtaufm.	FALX 0.200
Schlichtaufm.	FAL 0.300
V. Schruppen	FF1 0.300
V. Eintauchen	FF2 0.200
Verweilzeit	DT 0.000
Weglänge	DAM 0.000
Abhebeweg	VRT 1.000

Obr. 3.8 Programování hrubovacího cyklu pro WINNC SINUMERIK 810 D / 840 D [17]

3.2 Možnosti zvyšování efektivity soustružení

Důležitým faktorem z hlediska efektivity obrábění je použití moderních obráběcích strojů. Metody a systémy adaptivního řízení, aktivní kontroly, diagnostiky a jejich nasazení na obráběcích strojích spolu s CAD/CAM systémy jsou předpokladem jak pro bezobslužný provoz vysoce automatizovaných strojů, tak pro zajištění požadované přesnosti a

spolehlivosti výroby a zvýšení ekonomických efektů.

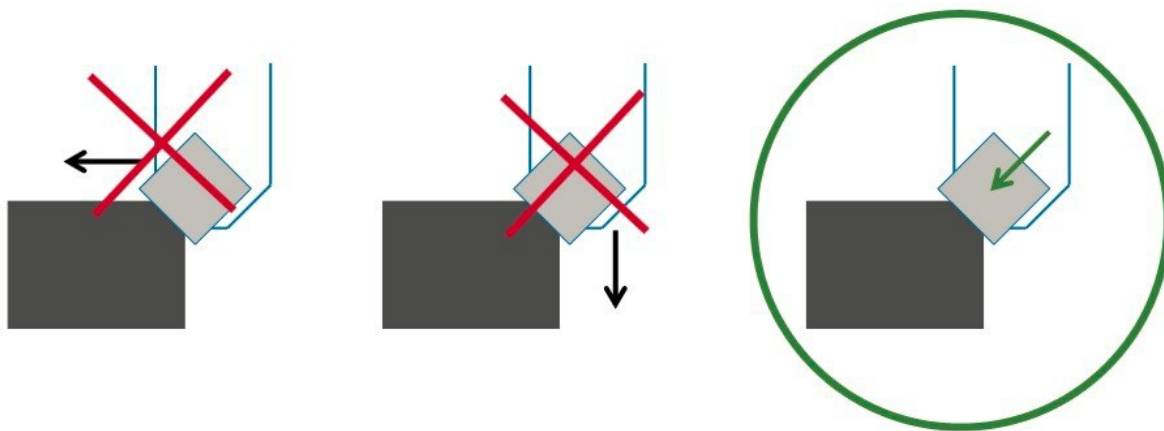
Následně jsou uvedeny některé nadstandardní úkony a vylepšení, které lze na moderních obráběcích strojích vykonávat:

- adaptivní řízení,
- aktivní kontrola,
- diagnostika,
- kompenzace deformace nástroje,
- aktivní kontrola rozměrů obrobku,
- identifikace stavu řezných nástrojů v průběhu řezného procesu,
- identifikace stavu a seřízení nástrojů mimo řezný proces,
- minimalizace teplotních deformací rámu strojů.

Úkony, jako je možnost efektivně ovlivnit najetí a vyjetí břitu ze záběru, korekce správného odvodu třísek a zabraňování jejich hromadění, by měli patřit mezi běžné úkony při obrábění.

Všeobecné aplikační doporučení při programování soustružnických cyklů jsou:

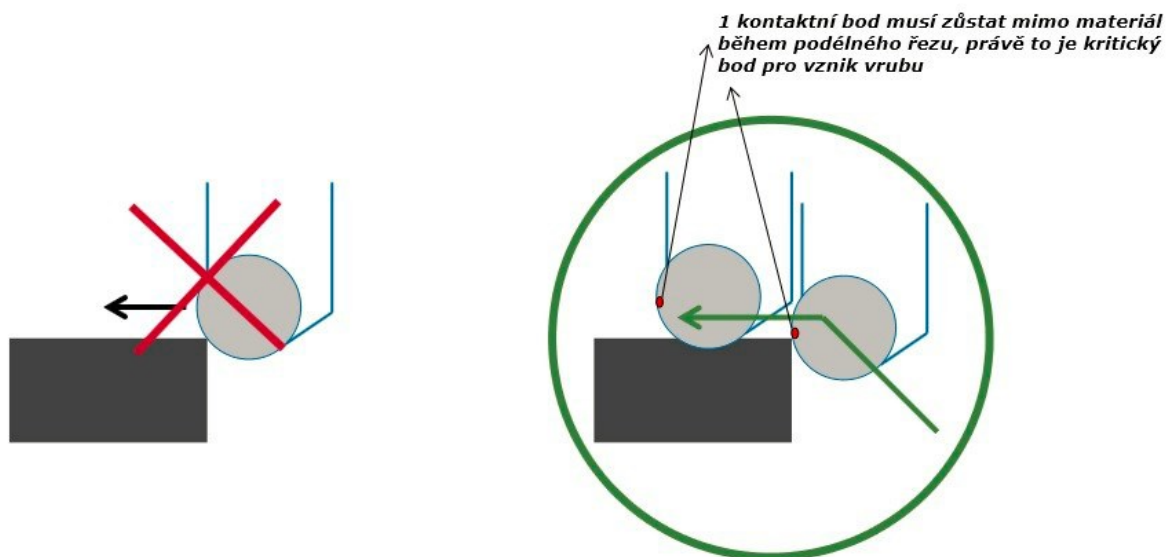
- dbát na předsrážení hran → dojde k eliminaci otřepů a prodloužení životnosti.



Obr. 3.9 Doporučení při programování - předsrážení hran [35]

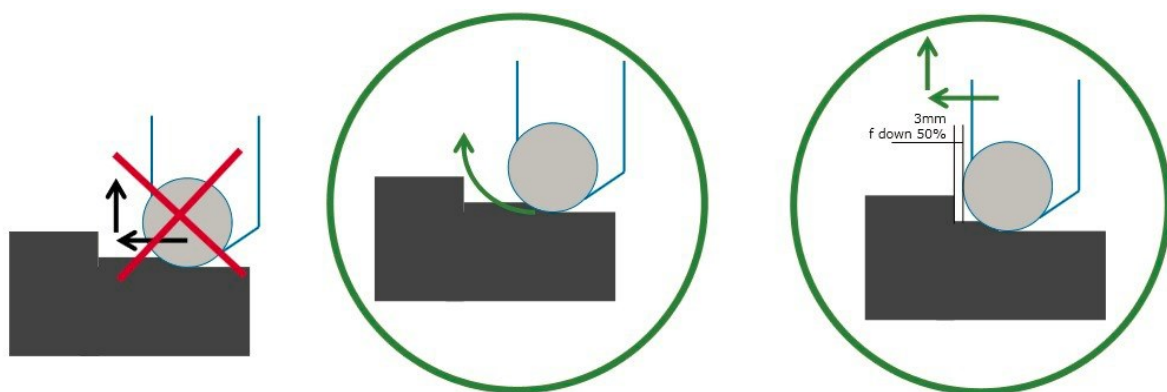
- dbát na správný vstup břitu do řezu - kontaktní bod musí zůstat mimo materiál během podélného řezu, aby nedocházelo ke vzniku vrubu → dojde k eliminaci

otřepů a redukci vrubů na řezné hraně.



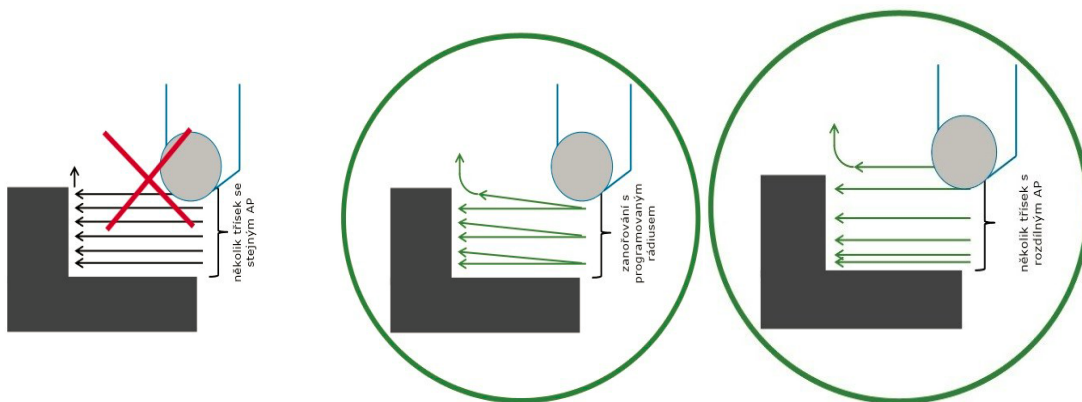
Obr. 3.10 Doporučení při programování - vstup do řezu [35]

- výstup z rohu s radiusem dvakrát větším než je rádius VBD, redukce posuvu o 50% a to minimálně 3 mm před rohem nebo pro dokončení rohu využít jinou VBD → dojde k hladšímu uvolnění a zvýšení životnosti.



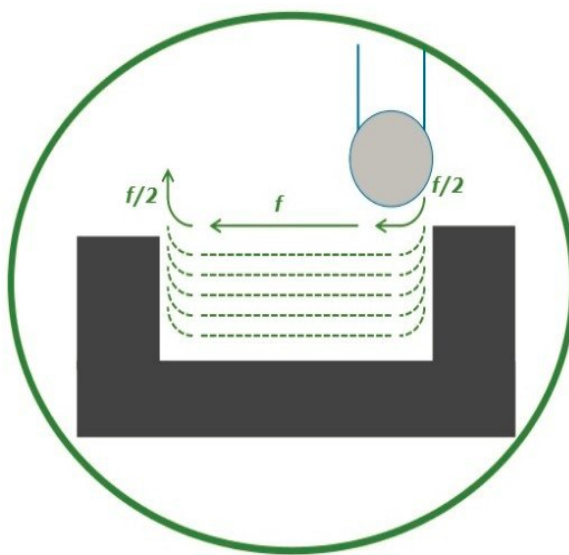
Obr. 3.11 Doporučení při programování - výstup z rohu [35]

- hrubovací operace s rozdílnými řezy (zajížděcí funkce s využitím rádiusů) → dojde ke snížení vrubového opotřebení.



Obr. 3.12 Doporučení při programování - hrubovací operace [35]

- podélné soustružení s rádiusovou destičkou → snížení posuvu při náběhu a výběhu.



Obr. 3.13 Doporučení při programování - podélné soustružení [35]

3.3 Výhody využití pokročilých řídicích systémů

Řídicí systém je nedílnou součástí CNC stroje. Nově vyvinuté softwary umožňují řídit až 40 os, z toho 24 současně. Požadavky kladené na CNC řídicí systémy jsou:

- rychlost a přesnost,
- funkce ovládání,
- komunikace s okolím,
- diagnostika.

Pokročilé řídicí systémy s propracovaným dílenským programováním obsahují v současnosti celou řadu funkcí pro efektivní obrábění. Zmiňované funkce zlepšují nejen přesnost a rychlost obrábění, ale také přesnost (eliminace chyb) a rychlost programování [50].

Mezi výhody použití pokročilých řídicích systémů a výhody dílenského programování v těchto řídicích systémů patří [53] například:

- 1) Jednoduchost programování – jsou uživatelsky intuitivní. Tím zkracuje čas potřebný pro zhotovení NC programu daného dílce.
- 2) Použitelnost pro programování jednoduchých ale i složitých tvarů.
- 3) Programovat lze přímo na stroji, nebo na programovacím pracovišti, odkud se následně program nahraje do stroje.
- 4) Pro jednoduché úseky (např. frézování rovinných ploch) není nutné vytvářet NC program, ŘS umožňuje obrábění i v ručním režimu pomocí ručního kolečka.
- 5) Programovat lze přímo na stroji, nebo na programovacím pracovišti, odkud se následně program nahraje do stroje.
- 6) Výhodou je programování pomocí stanice, kde je možnost programovat stejně jako na obráběcím stroji. Pracuje se s obvyklým TNC ovládacím panelem, stejným jako je na stroji.
- 7) Tyto programovací pracoviště plně nahrazují dílenské programování na obráběcích centrech. Nejedná se tedy o pouhou simulaci vytváření NC programu mimo obráběcí stroj, tak jak se tomu často děje s využíváním PC s nainstalovaným řídicím systémem. Dílenské programování na programovací

stanicích se simulací a testováním programu probíhá stejně jako na reálném stroji. Tento způsob plně nahrazuje programování na obráběcím stroji. Konfigurace programovacích pracovišť je s naprosto stejnou originální klávesnicí a designem obráběcího stroje.

- 8) Tyto programovací stanice se s výhodou využívají při výuce programování. Většinou jsou umístěné v přímé linii se stroji a dávají studentům reálný pocit programování jako u obráběcího stroje.
- 9) Řídicí systémy umožňují korekci dráhy nástroje o korekční hodnotu pro délku nástroje v ose nástroje a pro rádius nástroje v rovině obrábění. Lze využít délkovou a průměrovou/rádiusovou korekci, kterou lze zjistit pomocí nástrojové sondy.
- 10) Kontrolou nástroje během obrábění lze zjistit také opotřebení nebo zlomení nástroje. Jsou-li zjištěné odchylky větší než zadaná tolerance, nebo když nástroj překročil svoji životnost, řídicí systém nástroj zablokuje a vymění ho automaticky za stejný, nebo obdobný nástroj, pokud je tedy dostupný.
- 11) Použití v dílenských provozech, ale také v automatizované výrobě, např. u výrobních center se zásobníky nástrojů a výměníků palet.
- 12) Dynamická kontrola kolizí.
- 13) Minimální čas zpracování NC bloku.
- 14) Rychlé opracování s předem zadanou přesností (zadání přípustné odchylky od ideální kontury).
- 15) Použití nanointerpolace – počítá žádanou hodnotu polohy v digitálním servosystému v nanometrech, i když je 1 μm nastaven jako přírůstek CNC.
- 16) Nezávislé ovládání os – umožňuje zadávat různé hodnoty maximální rychlosti a zrychlení jednotlivým osám. V minulosti nejpomalejší osa určovala a ovládala vyladění pro celý stroj.
- 17) Použití interpolace spline.
- 18) Kompresor programů – funkce, pomocí něhož lze programy vytvořené z lineárních bloků konvertovat přímo v systému do bloků spline.
- 19) Omezení zrychlení – funkce zajišťující omezení zrychlení. Je užitečná hlavně při obrábění oblouků s menším poloměrem. Velké oblouky dokáže stroj

vyrobit rychle a přesně, zatím co u malých, z důvodu velkého zrychlení, existuje riziko odchýlení se od požadované kontury.

- 20) Automatická detekce rohů - při požadavku vysoké přesnosti, nástroj odpovídajícím způsobem zpomalí v oblasti rohů. Pokud přesnost nehraje významnou roli, může nástroj obrábět v této oblasti s větší rychlostí. Tato funkce umožňuje uživateli přizpůsobit práci stroje požadované přesnosti.
- 21) Funkce APC (Advanced Positron Control) – pomocí této funkce lze významnou měrou potlačit rezonanční frekvenci. Každý stroj má několik vlastních rezonančních frekvencí, které vznikají uvnitř stroje v různých místech. Tyto rezonance omezují maximální rychlost stroje a zhoršují kvalitu obráběného povrchu.
- 22) Ovlivnění zrychlení – pomocí zadaných příkazů lze ovlivňovat profil zrychlení. Např. povel Soft v řídicím systému Sinumerik 840D změní skokové zrychlení na lineární charakteristiku, čímž se prodlouží životnost stroje a zvýší se kvalita výrobku z důvodů potlačení rezonance stroje.
- 23) Funkce look-ahead - načítání bloků dopředu. Mezi různými typy řídicích jednotek posunu je rozdíl především v předem načítaných blocích. Čím složitější je jednotka, tím více bloků načítá dopředu. To je obzvláště důležité u vysokorychlostního obrábění, kde se zpracovávají velice malé bloky. Pokud se malé bloky zpracovávají rychle, velký počet načítaných bloků dopředu (look-ahead) zaručí, že v řídicí jednotce bude dostatek dat. Nedostatek dat má za následek trhavý pohyb a tím i negativní vliv na výsledek obrábění.

4. NÁVRH EFEKTIVNÍCH HRUBOVACÍCH CYKLŮ SOUSTRUŽENÍ

Disertační práce navrhuje nové hrubovací cykly s proměnou hloubkou řezu. Tyto hrubovací cykly budou následně popsány a uvedeny jejich možnosti uplatnění v praxi, zejména s ohledem na jejich vytvoření (tzv. naprogramování).

Práce popisuje následující hrubovací cykly:

- Hrubovací cyklus „úbytek záběru“.
- Hrubování s vytvářením kuželové plochy.
- Hrubování nepřímkovými metodami.

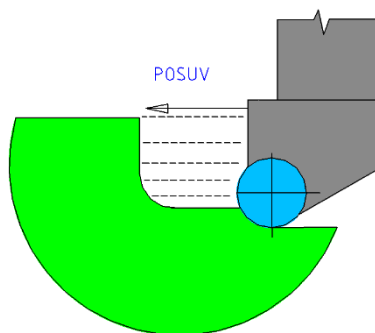
4.1 Hrubovací cyklus „úbytek záběru“

Při této strategii je každý úběr třísky realizován jinou hloubkou řezu (*Obr 4.1*) tudíž při každém řezu je namáhána jiná řezná část nástroje. Obrábění tímto způsobem může být časově náročnější, vlivem použití více přejezdů, ale kompenzuje se zvýšením životnosti nástroje, snížením zatížení na vřetení stroje, snížením hlučnosti stroje.

Hloubka řezu je směrem ke konečnému průměru zmenšována. Místo největšího opotřebení se tedy posouvá směrem ven z řezu, čímž dosahujeme delší životnosti řezného nástroje.

Tento druh hrubovacího cyklu je již obsažen ve vyspělých CAM systémech, např. v Mastercamu, EdgeCAMu. Lze jej také naprogramovat přímo na stroji bez použití CAD/CAM systémů, stejně tak jako cyklus s vytvářením kuželové plochy.

Použití je výhodné zejména při soustružení delších součástí, vzhledem ke stále se zmenšující tuhosti obrobku.

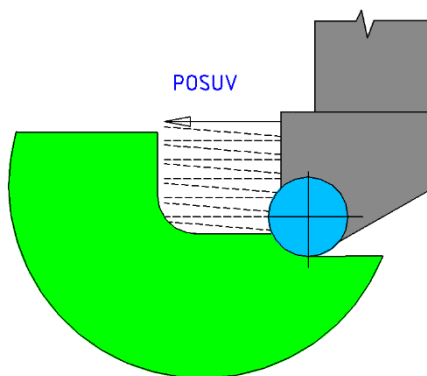


Obr. 4.1 Hrubovací cyklus „Úbytek záběru“ [XI]

4.2 Hrubování s vytvářením kuželové plochy

Obrábění s vytvářením kuželové plochy začíná úběrem s největší hloubkou řezu, která se ve směru posuvu zmenšuje. Tím se dostává vyměnitelná břitová destička (VBD) více ze záběru a přitom vytváří kuželovou plochu. Druhý řez je naprogramován rovnoběžně s osou obrobku, čímž se efektivně odstraňuje kuželová plocha, která byla utvořena v předchozím záběru.

Díky této strategii se opotřebení nástroje pohybuje po břitu podle délky styku hlavního ostří s obrobkem. Tedy podle velikosti hloubky řezu a_p . Hloubka řezu se opakovaně mění od maximální po minimální hloubku ($a_{p \max}$ do $a_{p \min}$.) a naopak, tak jak je vidět na obrázku Obr. 4.2.

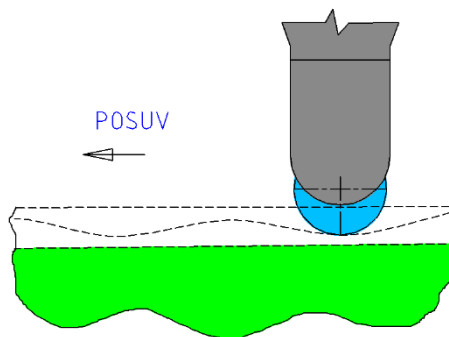


Obr. 4.2 Hrubování s vytvářením kuželové plochy [XI]

4.3 Hrubování nepřímkovými metodami

Hrubovací cyklus nepřímkovou metodou zajišťuje rovněž dosažení proměnné hloubky řezu. Např. vlnovitý profil (Obr. 4.3) dráhy nástroje dosáhne stejného efektu, jako metody předchozí. V prvním i druhém řezu obráběný materiál vlivem proměnné hloubky řezu stupňovitě vzrůstá a klesá a tím dosahujeme požadované strategie s nekonstantní hloubkou řezu.

Je možno také posouvat obráběný povrch a tím měnit hloubku řezu. To ale vyžaduje pokročilý CAD/CAM systém spojený se špičkovými obráběcími CNC stroji.



Obr. 4.3 Nepřímková metoda [XI]

Navrhované hrubovací cykly nemusí mít jen pozitivní účinky na proces obrábění. Je třeba zvážit veškeré aspekty s těmito navrženými cykly související. Mezi ně lze zařadit např.:

- snížení tuhosti obráběcího stroje vlivem pohybu nástroje ve dvou osách současně,
- zvýšené nároky na řezný nástroj,
- zvýšení požadavky kladené na obsluhu stroje – operátora,
- zvýšení požadavky kladené na programátora/seřizovače,
- zvýšení požadavky kladené na požadavky kladené na software - CAM systém,
- zvýšení požadavky kladené na možnosti dílenského programování.

4.4 Možnosti programování efektivních strategií

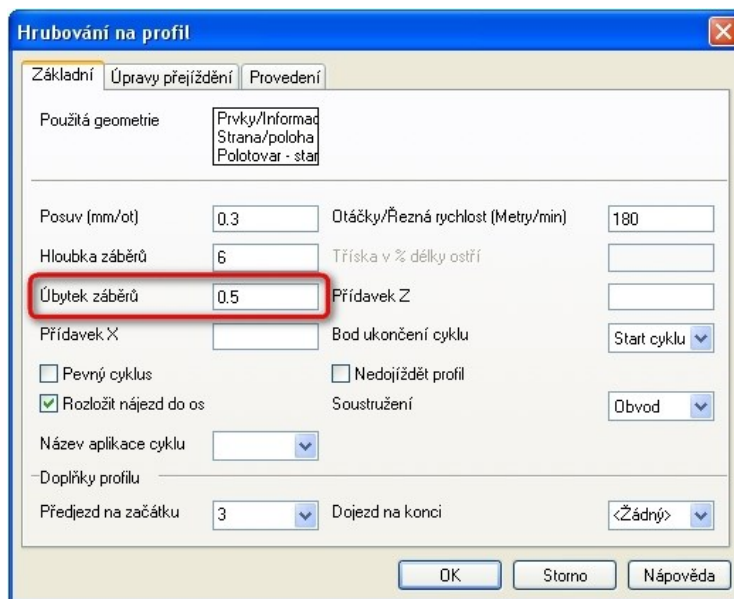
Podle druhu hrubovacího cyklu lze určit, jestli je možné hrubovací cyklus s proměnnou hloubkou řezu navolit ručním zápisem NC kódu nebo běžným dílenským či dialogovým programováním nebo jestli je nutné využití CAD CAM systémů. Strategie úbytek záběru a strategie s vytvářením kuželové plochy lze efektivně (v závislosti na složitosti dílce i nejrychleji) naprogramovat dialogovým programováním. Tímto způsobem byly rovněž vytvářeny dráhy nástroje v experimentální části.

Cykly hrubování nepřímkovými metodami (vlnovitý profil) s proměnnou hloubkou řezu však nejde jednoduše navolit ručním zápisem NC kódu, ani běžným dílenským programováním v řídicím systému stroje. Těmito způsoby by bylo programování nemožné, nebo velice náročné a časově zdoluhavé, proto se nabízí možnost off line programování s využitím CAD/CAM systémů.

Hrubovací cyklus programovaný v CAD/CAM systému nabízí komfortní prostředí zadáním potřebných parametrů obrábění, včetně různých typů nájezdů, odjezdů a přejezdů nástroje.

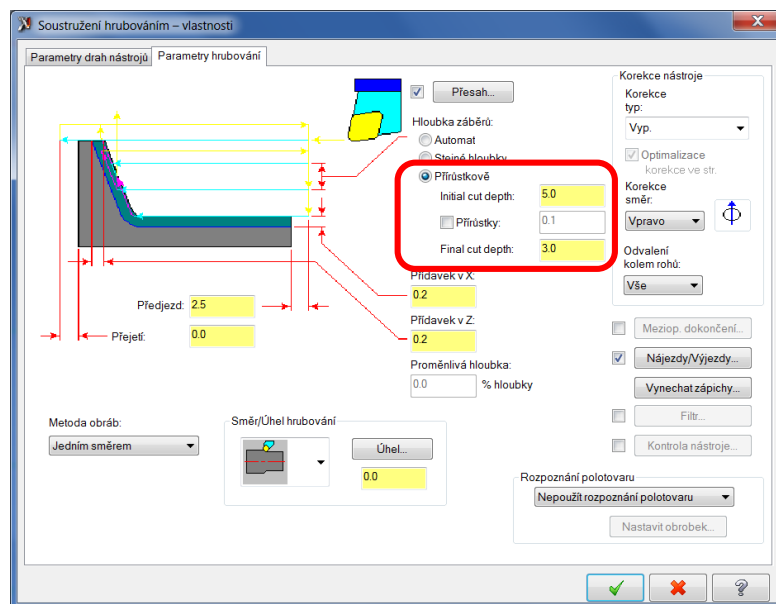
Moderní CAD/CAM systémy nabízí volbu dráhy nástroje zvanou úbytek záběru. To je jedna z typů dráhy nástroje pro užití proměnné hloubky záběru.

Možnost nastavit úbytek záběru v EdgeCAM (Obr. 4.4) je v menu Operace, v nabídce cyklu „Soustružení na profil“. Pro tuto volbu je nutné vybrat profil (tj. obrys tvaru, který se obrábí).



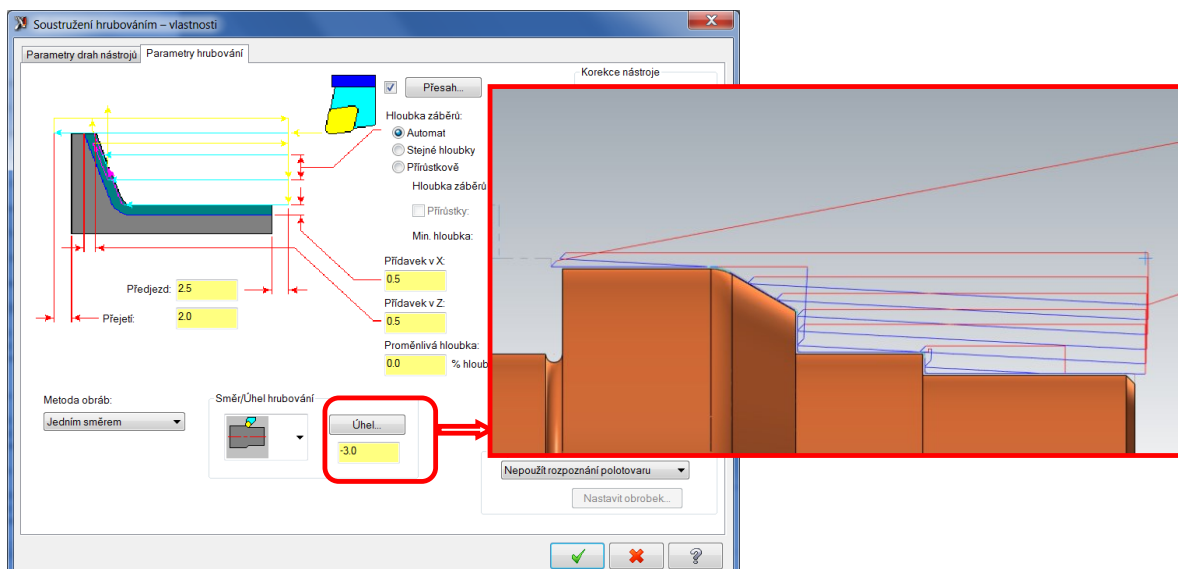
Obr. 4.4 Programování hrubovacího cyklu v CAM systému EdgeCAM

Možnost nastavit parametry obrábění strategií úbytku záběru v CAM systému Mastercam (verzi X8) je ukazuje následující obrázek Obr 4.5.



Obr. 4.5 Programování hrubovacího cyklu v CAM systému Mastercam X8 se zvýrazněním možnosti zadání úbytku záběru

CAM systému Mastercam (verzi X8) umožňuje také nastavit kuželový záběr v hrubovacím cyklu soustružení, viz. následující obrázek Obr. 4.6.



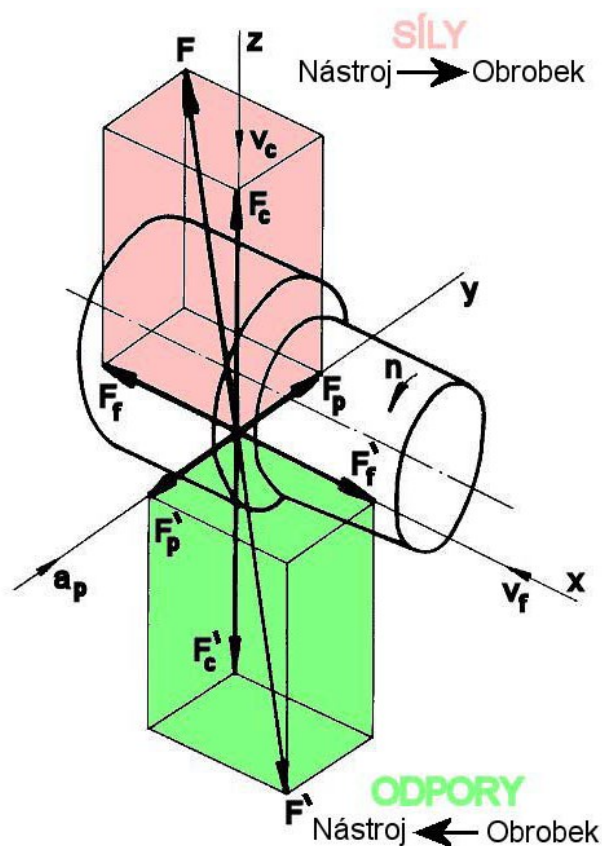
Obr. 4.6 Programování hrubovacího cyklu v CAM systému Mastercam X8 s možností nastavení úhlu se zvýrazněním možnosti zadání úbytku záběru

5. MĚŘENÍ SIL ŘEZÁNÍ PŘI SOUSTRUŽENÍ

Použitím proměnné hloubky řezu se očekává nejen změna velikosti síly řezání, ale také změna orientace jednotlivých složek síly řezání a jejich poměru. Očekává se snížení pasivní složky síly řezání (při podélném soustružení), která zejména ovlivňuje přesnost výroby. To plyne z teoretických poznatků o problematice silových působení při soustružení.

Předpoklad snížení síly řezání se prokázalo při sledování aktuálního výkonu obráběcího stroje (na ukazateli aktuálního výkonu obráběcího stroje) při prvotních výzkumech řešitelky v diplomové práci. V těchto měřeních pokleslo zatížení vřetene soustruhu při obrábění s proměnnou hloubkou řezu o 10 %.

Působením pasivní (radiální) složky síly F_p (Obr. 5.1), kterou působí řezný nástroj na obrobek při soustružení, vznikají deformace stroje, nástroje, obrobku, tj. mění se poloha nástroje vůči obrobku. Toto hlavně ovlivňuje přesnost práce stroje. [28]



Obr. 5.1 Složky síly řezání při soustružení [19]

Jednou z možností stanovení síly řezání, která je také zvažována v experimentální části práce, je přímé měření složek síly řezání a jejich točivých momentů. Zakládá na měření deformací v soustavě stroj - nástroj - obrobek během obrábění prostřednictvím dynamometrů.

5.1 Měření sil

Měření složek síly řezání v průběhu obrábění má své opodstatnění při optimalizaci procesu řezání, nebo se také používá jako nepřímá metoda pro určování opotřebení vyměnitelných břitových destiček, pro zjišťování trvanlivosti obráběcích nástrojů nebo při dodržování požadované jakosti povrchových vrstev obrobku. Měření sil obrábění můžeme rozdělit na přímé a nepřímé.

5.1.1 Přímé měření sil

Přímé měření složek síly řezání se zakládá na měření deformací v soustavě stroj, nástroj, obrobek, přípravek během obrábění prostřednictvím dynamometrů. Dynamometr jakožto měřicí přístroj musí zaručit nezávislost měřicí veličiny na provozních vlastnostech přístroje. Konstrukce dynamometrů musí zaručit, aby se složky řezné síly vzájemně neovlivňovaly. Dále se od něj požaduje schopnost měřit sledovanou veličinu ve zvoleném rozsahu s maximální přesností, musí zaručit stálost naměřených hodnot s časem včetně její reprodukovatelnosti.

Aparatura na měření složek síly řezání se zpravidla skládá ze tří částí [17]:

1. **Pružný člen** – přebírá vnější zatížení a překonává jisté změny (deformace, změna polohy apod.).
2. **Snímač** – mění mechanickou veličinu změny pružného členu na hodnotu analogického parametru měřicí aparatury.
3. **Přijímač** – zesiluje a zpracovává signál snímače, případně zapisuje velikost zatížení.

Rozdělení dynamometrů lze provést dle následujících hledisek: [17]

- podle počtu měřených složek síly řezání jde o dynamometry jednosložkové, dvousložkové, třísložkové a pro měření kroutcích momentů,
- podle aplikované měřicí metody, respektive dle způsobu přenosu působení síly z deformačního členu na indikační - dynamometry mechanické, hydraulické,

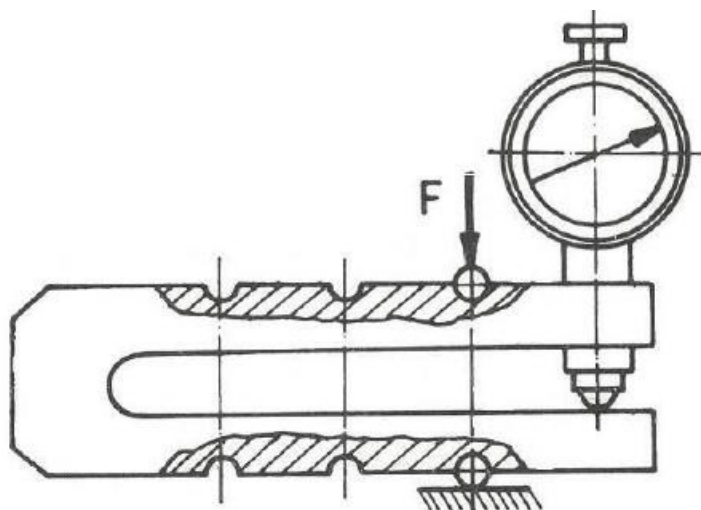
pneumatické, elektrické (indukční, kapacitní, odporové, využívající piezoelektrického jevu), optické,

- podle metody obrábění to jsou dynamometry pro soustružení, frézování, vrtání, broušení atd., případně dynamometry univerzální [16][36].

Aparatura pro použití v experimentální části je uvedena v kapitole 7 - Praktická realizace experimentálních částí.

U mechanických dynamometrů se působení síly přenáší přímo nebo znásobeně mechanickým převodem na měřicí prvek, jako je například číselníkový úchylkoměr.

O velikosti síly se usuzuje z deformace silových pružin, kroužků, třmenů, nosníků, membrán, případně podle hloubky vtlačení kuličky do materiálu o známé tvrdosti. Hlavním představitelem této skupiny dynamometrů jsou dynamometry třmenové, které jsou vhodné pro zatížení až do 10 000 N (*Obr. 5.2*) [16][36].



Obr. 5.2 Mechanický dynamometr třmenový [36]

Podstatou hydraulických dynamometrů je přenos účinku měření síly nebo momentu na píst nebo membránu hydraulického obvodu, jejichž pohyb způsobuje změnu tlaku v kapalině. Tato změna je potom snímána pomocí manometru, nebo jiným přístrojem. Výhodou těchto dynamometrů je jednoduchá konstrukce a možnost snadného měření více

složek současně. Nevýhodou naopak nízká citlivost, požadavky na dokonalé utěsnění systému a velká setrvačnost. Proto se nedají použít pro dynamická měření.

Podstatou pneumatických dynamometrů je snímač deformace pneumatickým systémem klapka - tryska, který využívá dynamických vlastností vzduchu procházejícího štěrbinou. Jsou principiálně založeny na měření změny tlaku nebo průtoku v závislosti na změně výtokového průřezu mezi klapkou a tryskou v deformačním elementu [16][36].

Elektrické dynamometry patří mezi nejrozšířenější a nejvíce používané dynamometry v technické praxi. Dle způsobu mechanicko-elektrické transformace je možné rozlišovat dva základní systémy elektrických dynamometrů:

- systémy parametrické, které jsou založeny na změně jednoho z parametrů elektrického obvodu – indukčnosti L , kapacity C a odporu R ,
- systémy generátorové, které jsou založeny na vzniku napětí nebo proudu při deformaci elementů. Podstatou může být i mimo jiné piezoelektrický jev [16][36].

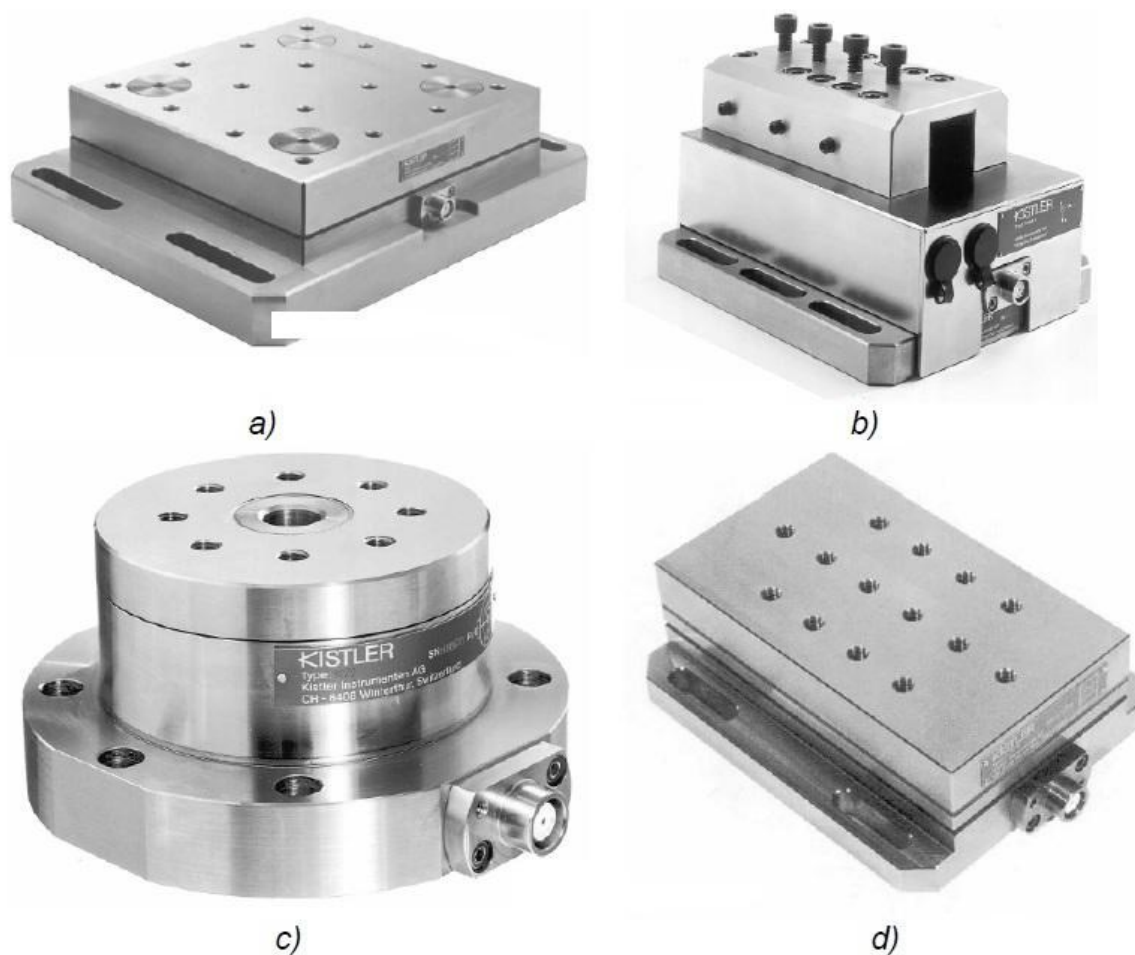
Dvousložkový elektrický dynamometr pro soustružení je konstruován jako držák soustružnického nástroje, ustavený na dva stejné nosníky souměrně umístěné k zatěžující síle. Tenzometry jsou nalepeny pouze na jednom z těchto měrných nosníků.

Dynamometr lze použít pro měření složek síly řezání F_c a F_p . Na dynamometru nejsou pohyblivé části, tuhost měrných článků je v místech, kde jsou nalepeny tenzometry snížena do té míry, aby byla zajištěna co největší tuhost při maximální citlivosti. Měrné nosníky jsou od držáku soustružnického nože odizolovány [16][36].

Třísložkový dynamometr se skládá z pláště o vysoké tuhosti, z tělesa držáku nože a měřicích článků, jejichž nedílnými součástmi jsou tenzometrické snímače. Samostatnou část tvoří část elektrická. Proti vniknutí třísek k snímacím článkům je tento dynamometr opatřen pevným krytem. Tento dynamometr používá zpravidla 8 snímacích článků. Těleso nožového držáku je uloženo na snímacích člancích obsahujících deformační tělíska s nalepenými tenzory. Uložení držáku v tělese dynamometru je provedeno přes kuličky, které spočívají v kulových lůžkách nebo působí přes plochou opěru [16][36].

Univerzální dynamometr je stejně jako dynamometry předchozí řešen bez pohyblivých částí, a to monolitickým celkem základové desky s bočními stěnami opatřenými odnímatelnými kryty. V přední desce je otvor pro řezný nástroj, v horní otvor pro vyvedení

částí měrného hranolu, který svým tvarem a rozměry umožňuje upnutí jak soustružnického nože, tak přípravku pro univerzální použití na dalších obráběcích strojích. Dynamometr je určen pro snímání složek síly řezání F_c , F_f a F_p , ale i kroutícího momentu [16][36].



Obr. 5.3 Dynamometry KISTLER: a) pro frézování, b) pro soustružení, c) pro vrtání, d) pro broušení [16][37][38]

5.1.2 Nepřímé měření sil

Další možností měření síly řezání je nepřímé měření. Metody pro nepřímé měření vycházejí převážně z výkonu elektromotoru obráběcího stroje. Ze známého vztahu, následně uvedeného, pro užitečný výkon při obrábění plyne, že nepřímých měření lze z výkonu hnací

jednotky stanovit pouze tangenciální složku síly řezání. [17]

$$P_{už} = F_c \cdot v_c \quad [\text{W}] \quad (1)$$

kde: $P_{už}$ - užitečný výkon [W],

F_c - tangenciální (řezná) složka síly obrábění (řezání) [N],

v_c - řezná složka rychlosti obrábění [m.s^{-1}].

Při měření výkonu elektromotoru obráběcího stroje se převážně používá wattmetrů, které v porovnání s jinými metodami měření výkonu střídavého proudu dávají přímý údaj. Při stanovení tangenciální složky síly obrábění se vychází z užitečného výkonu, potřebného k vlastnímu řezání. Nejprve se proto změří výkon nezatíženého obráběcího stroje, tj. výkon chodu naprázdno P_o , potom se proměří celkový výkon obráběcího stroje při obrábění P_c . Pro užitečný výkon $P_{už}$ pak platí rovnice 2 [16][36].

$$P_{už} = P_c - P_o \quad [\text{W}] \quad (2)$$

kde $P_{už}$ - užitečný výkon [W],

P_c - celkový výkon obráběcího stroje [W],

P_o - výkon při chodu naprázdno [W].

Tangenciální složku síly řezání lze následně určit ze vztahu (3).

$$F_c = P_{už} / v_c \quad [\text{N}] \quad (3)$$

kde: $P_{už}$ - užitečný výkon [W],

F_c - tangenciální (řezná) složka síly obrábění (řezání) [N],

v_c - řezná složka rychlosti obrábění [m.s^{-1}].

Uvedená metoda nepřímého stanovení tangenciální složky síly obrábění je poměrně jednoduchá, nevyžaduje nákladnou speciální měřicí techniku a je možné ji použít u všech způsobů obrábění. Nevýhodou této metody je omezená přesnost měření, způsobená rozdílnou účinností stroje při zatížení a při chodu naprázdno a zanedbání vlivu ostatních složek síly řezání na výkon elektromotoru obráběcího stroje [16][36].

6. OPOTŘEBENÍ BŘITU ŘEZNÝCH NÁSTROJŮ

Opotřebení nástroje je produktem kombinace zatěžujících faktorů, působících na břit. Opotřebení je tedy interakcí mezi nástrojem, materiálem obrobku, řezným prostředím a řeznými podmínkami. Při obrábění vzniká velké množství tepla, které se vyvíjí na ploše hřbetu a čela nástroje. Tepelná zatížení značně namáhají materiál břitu nástroje. Svůj vliv má také dynamický faktor, kdy břit nástroje z materiálu vystupuje a opět do něj vniká (např. při frézování). Procesem utváření třísky, provázeném vysokým tlakem a teplotou se průběžně vytváří čistý kovový povrch, při kterém má obráběný materiál sklon k chemickým reakcím nebo k difúzním procesům. Většina obráběných materiálů obsahuje tvrdé částice různého druhu. Tyto částice nezřídka dosahují tvrdosti materiálu břitu nástroje. Dochází tak k abrazivnímu efektu [49].

Kombinací výše uvedených mechanických, tepelných, chemických a abrazivních faktorů dochází ke složitému zatěžování břitu nástroje. Toto se pak projevuje opotřebováním nástroje. K základním mechanismům opotřebení patří zejména:

- abraze,
- adheze,
- difúze,
- oxidace,
- plastická deformace,
- křehký lom [39][40][41].

Pohled na břit nástroje ve zvětšení a posouzení, jaká opotřebení jsou na něm viditelná, umožňuje kontrolovat vhodnost trvanlivosti, její spolehlivost a dokonce i možnost jejího prodloužení. Správný nástroj a odpovídající řezné podmínky, kvalifikovaná odborná pomoc, vlastní zkušenosti, dobrá jakost materiálu obrobku a dobré podmínky pro obrábění jsou důležitými předpoklady pro vznik ideálního průběhu opotřebení.

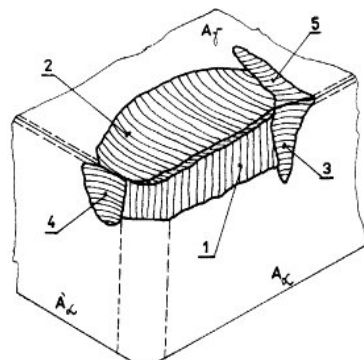
Všechny břity řezných nástrojů podléhají opotřebení. Opotřebení nastává v průběhu řezného procesu a závisí na několika faktorech, jsou to především: volba řezných podmínek, typ řezného materiálu, užití procesní kapaliny, řezná geometrie řezného nástroje a mnoha dalších [40][41].

Jelikož jsou uvažované experimenty uvažovány s řezným materiálem - slinutý karbid

budou níže uvedeny podrobnosti, které se týkají tohoto řezného materiálu.

6.1 Opotřebení nástroje ze slinutého karbidu

U slinutého karbidu (*Obr. 6.1*) si lze povšimnout výrazného vrypu opotřebení na čele a na hlavním hřbetu, kterého by bylo velmi výhodné využít u hrubovacích cyklů s proměnnou hloubkou řezu. Snaha bude tento výrazný vryp rozložit na co největší délku řezné části nástroje a celkově snížit hloubku vrypu u řezného materiálu.



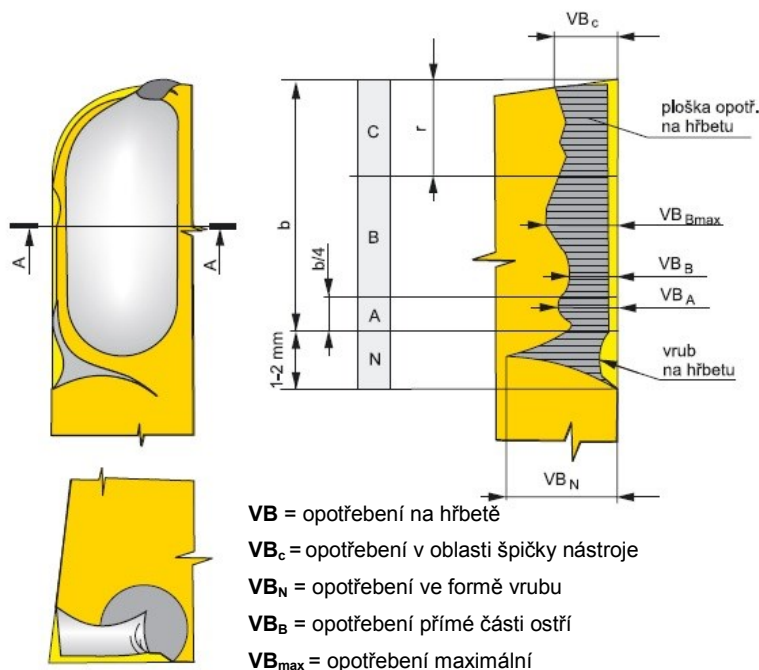
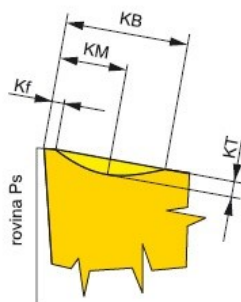
Legenda k obrázku

- 1 - plocha na opotřebení hřbetu
- 2 - žlábek na čele
- 3 - rýha na hřbetu
- 4 - rýha na vedlejším hřbetu
- 5 - rýha na čele

Obr. 6.1 Průběh opotřebení slinutého karbidu [5][31]

ŘEZ A-A

- K_f** = vzdálenost okraje výmolu
- K_B** = šířka výmolu
- K_M** = vzdálenost středu výmolu
- K_T** = hloubka výmolu

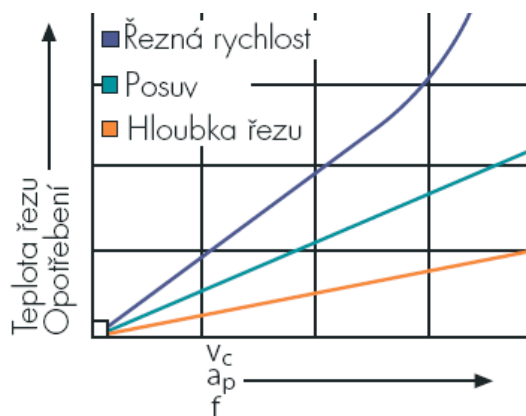


Obr. 6.2 Opotřebení u slinutého karbidu dle normy ISO 3685 [31]

Opotřebení závisí na mnoha různých faktorech např. řezná rychlost, posuv, hloubka řezu, úhel čela, typ řezného materiálu, užití procesní kapaliny a mnoha dalších.

Jelikož se disertační práce bude zabývat proměnnou hloubkou řezu, bude se pro docílení zvýšení trvanlivosti zaměřovat na závislosti opotřebení na hloubce řezu a to u vybraného řezného materiálu – slinutý karbid (SK).

Je dokázáno, že hloubka řezu nemá podstatný vliv (*Obr. 6.3*) na intenzitu opotřebení [5], [17], [7], [26]. Jelikož se však také podílí na intenzitě opotřebení, (se zvětšující se hloubkou řezu opotřebení roste) má smysl se hloubkou řezu zabývat a považovat ji za jeden faktorů, které ovlivňují opotřebení.



Obr. 6.3 Závislost opotřebení na řezných podmínkách [31]

U slinutého karbidu se jeví výhodné použít proměnnou hloubku řezu vzhledem k teoretickému opotřebení nástroje uvedeného na obrázku *Obr. 6.1* a *Obr. 6.2*.

Výrobci řezných nástrojů, pokud použití proměnné hloubky zmiňují jako prostředek ke zvýšení životnosti řezného nástroje, doporučují tuto variantu i s využitím řezného materiálu – řezná keramika. Avšak zkoumání tohoto doporučení nebude předmětem experimentů v této disertační práci.

6.2 Opotřebení při proměnné hloubce řezu

Opotřebení ve tvaru vrubu je způsobeno jak mechanickými příčinami, tj. v místě styku ostří s obrobkem, tak v souvislosti s oxidačním opotřebením. Mechanické příčiny lze ovlivnit aplikací proměnné hloubky řezu. Lze tvrdit, že čím větší vrub, tím větší mírou bude

docházet k oxidačnímu opotřebení a to vlivem většího prostupu vzduchu v oblasti vrypu, kdy toto místo VBD reaguje s okolní atmosférou.

Rýha na hlavním břitu - vzniká v oblasti styku břitu nástroje s povrchem obrobku. Vznik rýhy může být zapříčiněno:

- abrazivním opotřebením odcházející třískou,
- zpevněním povrchových vrstev obrobku,
- otřepy,
- oxidačním opotřebením (známé z vedlejšího hřbetu).

Opotřebení ve tvaru vrubu je způsobeno jak mechanickými příčinami, tj. v místě styku ostří s obrobkem, tak v souvislosti s oxidačním opotřebením. Mechanické příčiny lze ovlivnit aplikací proměnné hloubky řezu. Lze tvrdit, že čím větší vrub, tím větší mírou bude docházet k oxidačnímu opotřebení a to vlivem většího prostupu vzduchu v oblasti vrypu, kdy toto místo VBD reaguje s okolní atmosférou. [34]

U navrhované strategie se opotřebení neprojeví jako hluboká rýha na čele i hřbetu, ale je rozloženo do delší části, proto jsou zde oxidační projevy zmírněny, oproti použití konstantní hloubky řezu, kde je vryp opotřebení ve formě již poměrně hlubokého žlábků.

V navazujících experimentech na tuto práci by bylo také vhodné prozkoumat zmiňovaná tvrzení s použitím jiného povlaku na VBD, který by toto oxidační opotřebení mohl zmírnit.

7. PRAKTICKÁ REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍCH ČÁSTÍ

Experimenty byly převážně provedeny na domovské univerzitě na katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie. Pracoviště je vybaveno všemi potřebnými stroji a přístroji, které byly potřeba k provedení a zhodnocení následujících experimentů.

7.1 Stroje a zařízení použité při výzkumu

Pracoviště, na kterém byly provedeny experimentální práce je nově vybaveno soustružnickým obráběcím centrem, které je schopno realizovat navrhované cykly soustružení. Pro navrhované cykly soustružení je nutný pohyb ve dvou osách současně, které nelze zajistit na konvenčním obráběcím stroji.

Pro experimentální část bylo využito soustružnické centrum **DMG MORI NLX 2500 MC/700**. Tento stroj (*Obr. 7.1*) je schopen zajistit tuhé upnutí s dostatečným výkonem pro výzkum sil řezání. Parametry stroje viz. *Tabulka 1*



Obr. 7.1 Soustružnické centrum DMG MORI NLX 2500 MC/700

Tabulka 1 Základní parametry soustružnického centra DMG MORI NLX 2500 MC/700

Pracovní rozsah	Oběžný průměr nad ložem	787 mm
	Největší soustružená délka	705 mm
	Největší průměr obrobku	366 mm
	Rozsah délky ose Z	260 mm
	Rozsah délky ose X	795 mm
Vřeteno	Rozsah otáček	4000.min ⁻¹
	Výkon vřetene	18,5 kW
Nástroje	Počet nástrojů	12
	Počet poháněných nástrojů	3
	Výkon poháněných nástrojů	5,5 kW
Posunové pohony	Rychloposuv	30 000 mm.min ⁻¹
	NC Koník	

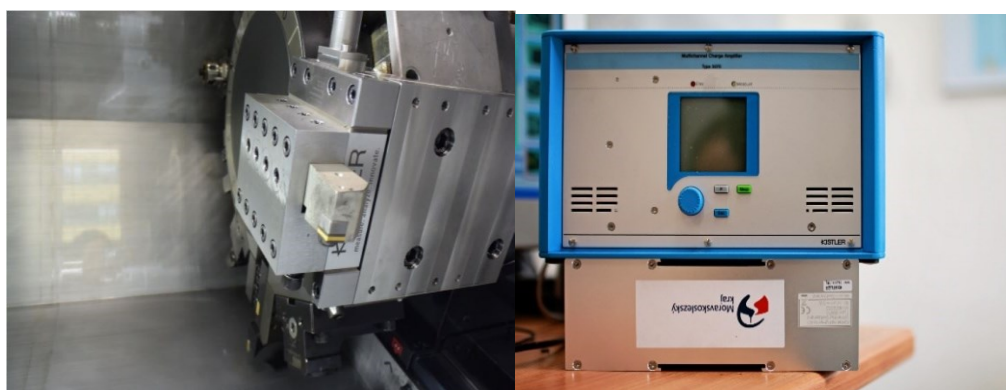
Současně je toto pracoviště vybaveno moderním měřicím zařízením pro zaznamenávání sil řezání (*Obr. 7.2*), které působí na řezný nástroj při obrábění. Jedná se o piezoelektrický třísložkový **dynamometr KISTLER 9129AA**, který je připojen k počítačové jednotce.

Měřicí aparatura pro stanovení velikostí a průběhů sil řezání je složena z těchto částí:

- třísložkový univerzální stacionární dynamometr KISTLER 9129AA (*Obr. 7.2*),
- nábojový zesilovač/převodník,
- DAQ box (systém sběru dat - digitálně analogový převodník), umožňuje zapojení dvou dynamometrů,
- software ke zpracování dat – Dynoware (*Obr. 7.4*),
- počítačová sestava.

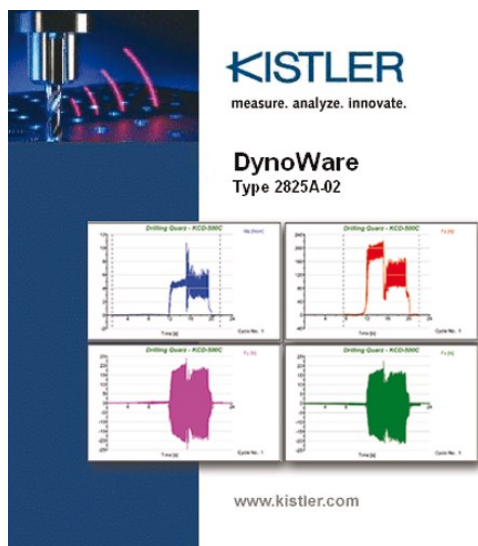


Obr. 7.2 Třísložkový univerzální stacionární dynamometr KISTLER 9129AA



Obr. 7.3 Piezoelektrický třísložkový dynamometr KISTLER 9129AA upnutý v přípravku (vlevo), nábojový převodník, DAQ box – vpravo

Pro zpracování naměřených hodnot byly využity softwary Dynoware společnosti Kistler, MS Excel a Matlab. Software Dynoware slouží pro vlastní měření sil řezání a následnou analýzu získaných dat (Obr. 7.4).



Obr. 7.4 Software ke zpracování dat – Dynoware

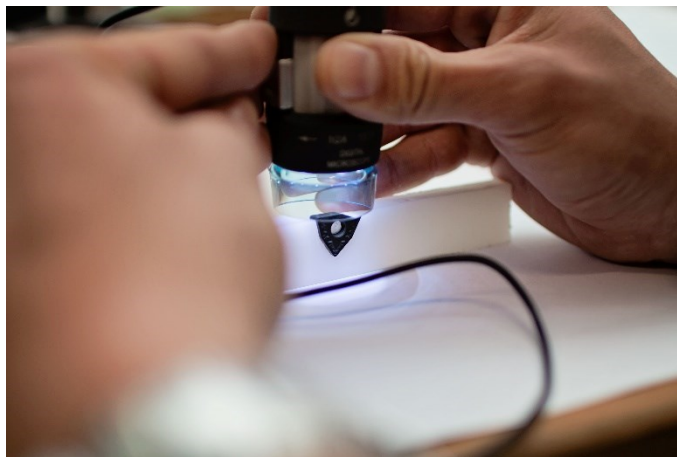
Na obrázku Obr. 7.5 je vidět propojení dynamometru, který je upnutý v přípravku, s počítačovou jednotkou a měřícím aparaturou pro stanovení velikostí a průběhu sil řezání.



Obr. 7.5 Propojení dynamometru upnutém v přípravku, počítačové jednotky, zesilovače a analogovému převodníku

K měření opotřebení nástroje se využívalo **mikrometrické metody měření** za využití dílenského mikroskopu viz. Obr. 7.8. Optika umožňuje až pětinasobné zvětšení, což dostatečně postačuje na měření opotřebení a pořizování detailních makro snímků. Při vyhodnocování experimentální části bude využit měřicí **software Motic Image Plus 2**.

Pro pořizování snímků se používal také přenosný ruční mikroskop Celestron Mini viz. Obr. 7.6.

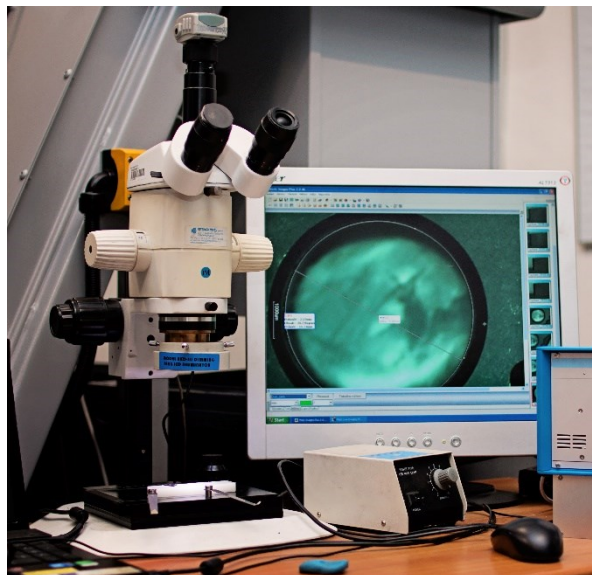


Obr. 7.6 Ruční mikroskop Celestron Mini

Pro měření, přesné snímání a pořizování snímků na dílenském mikroskopu byl vyroben přípravek z plastické hmoty, do kterého se destička (VBD) před každým měřením usadila viz. *Obr.7.7*.



Obr. 7.7 Přípravek pro měření na dílenském mikroskopu



Obr. 7.8 Dílenský mikroskop s připojením na počítačovou jednotku

7.2 Obráběný materiál

Obráběný materiál byl zvolen na základě jeho mechanických vlastností a s ohledem na jeho časté použití v praxi a předpokladem vzniku vrubového opotřebení. Použit byl materiál s označením 19 573 (X155CrVMo12 1, 1.2379). Chemické složení obráběného materiálů viz. *Obr. 7.9*.

C	Si	Mn	P max	S max	Cr	Mo	V
1,45-1,60	0,10-0,60	0,20-0,60	0,030	0,030	11,00-13,00	0,70-1,00	0,70-1,00

Obr. 7.9 Chemické složení materiálu 19 573

Výchozí tvar obrobku byl válcovitého tvaru - tyč o průměru 150 mm x 900 mm z materiálu (rozdělena na dvě části z důvodu možnosti upnutí do čelistí stroje). Vysoce legovaná chrom - molybden - vanadová ocel 1.2379 se vyznačuje vysokou otěruvzdorností, odolností proti opotřebení a dobrou houževnatostí. Má výbornou prokalitelnost, rozměrovou stálost při kalení a odolnost vůči popouštění. Kalitelná na vzduchu a vhodná pro kalení ve vakuu. Ocel se obtížně brousí, tváří za tepla a má i sníženou obrobiteľnosť v žíhaném stavu. Pevnosť 750 - 800 MPa. Dosažitelná tvrdosť po kalení 63 HRC.

Tabulka 2 Přehled obráběných materiálů

obráběný materiál	19 573	tvrdost
		HRC
před tepelným zpracováním		23
po zakalení		62

Materiál 19 573 se po zakalení s následnou tvrdostí 62 HRC nachází na horní hranici tzv. tvrdého obrábění, které můžeme definovat jako obrábění materiálů v rozmezí tvrdosti obráběného materiálu 55-64 HRC. [32]

Řezný proces při soustružení materiálů před tepelným zpracováním má jisté odlišnosti v porovnání s tvrdým soustružením. Základním rozdílem je aplikace menší hloubky řezu, posuvu ale i řezné rychlosti. [33]

Při tvrdém soustružení síla řezání a rozložení napětí v zóně řezání jsou výrazně ovlivněné tvrdostí obráběné součásti. Při obrábění nezakalených ocelí velikost složek řezné síly s rostoucí tvrdostí klesá. Jakmile tvrdost obráběného materiálu překročí 50 HRC, složky řezné síly začnou narůstat. [34]

7.2.1 Praktické využití oceli 1.2379 – 19 573

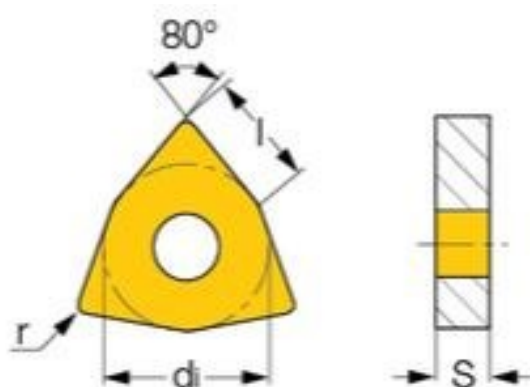
Ocel 1.2379 (X155CrVMo12-1, 19 573) je vhodná na nástroje pro práci za studena tj. všechny druhy nástrojů s velkou životností pro stříhání na lisech a děrování materiálů menších tloušťek a materiálů vysoké pevnosti (zejména tvarově složité nástroje pro stříhání např. transformátorových plechů a plechů z nerezavějících ocelí), nože pro tabulové nůžky na plech a pásovou ocel do tloušťky stříhaného materiálu cca 10 mm, nože na stříhání drátu apod. Nástroje pro tváření jako jsou např. menší průvlastky a nástroje pro tažení, všechny druhy nástrojů na přetváření a ražení materiálů. Dále je ocel vhodná na jednoduché a symetrické nástroje na protlačování a tlačení, nástroje na válcování závitů, hladké a profilové válce, kovádla i pro práce za tepla. Nástroje řezné jako jsou protahovací a protlačovací trny, profilové nože a tvarově složité frézy pro menší řezné rychlosti a pro obrábění nekovových abrazivních materiálů. Ocel také nachází uplatnění při výrobě velmi namáhaných forem a jejich částí pro tváření plastických a práškových hmot, skla, porcelánu a keramických materiálů. Vhodné použití oceli je i pro veškeré druhy průmyslových nožů jako: stříhací nože,

drťící nože, hoblovací nože, sekací a vysekávací nože, štípací nože, mlecí nože, strojní nůžky na dělení. U nástrojů na drcení a mletí se používá na kladiva drtičů a čelisti pro mletí a drcení, kde se využívá velmi dobrého poměru otěruvzdornosti a houževnatosti.

7.3 Použité řezné nástroje

Pro dosažení nejvyšší možné produktivity obrábění je rozhodující volba správného řezného nástroje. Volba materiálu a geometrie břitu hrají přitom zvláštní roli. Přesto se však může stát, že i při správné volbě nástroje nelze docílit uspokojivé doby trvanlivosti. Vibrace vznikající v průběhu obrábění, vyvolané například nedostatečnou tuhostí držáku nástroje nebo chybným upnutím obrobku, způsobují vždy předčasné ukončení trvanlivosti břitu [11].

Na experimentální část byly vybrány destičky s označením **WNMG 080408** od firem Pramet Tools a ISCAR viz *Obr. 7.10*. Jedná se řezné nástroje VBD ze slinutého karbidu, jejichž vhodnost byla dokázána v pracích řešitelky, viz. [ii], [X].



*Obr. 7.10 použitý typ VBD: WNMG 080408 E-FM; Pramet tools,
typ VBD: WNMG 080408-PP, ISCAR (stejná geometrie u obou výrobců)*

Vyměnitelné břitové destičky tvaru W byly vybrány vzhledem k jejich vhodnosti na polohrubovací operace, ale také vzhledem ke stále častějšímu přechodu na tento typ destiček ve strojírenských firmách. Je to hlavně z toho důvodu, že destičky WNMG mají navíc dvě řezné hrany oproti např. CNMG destičkám, které byly v užším výběru pro tento experiment.

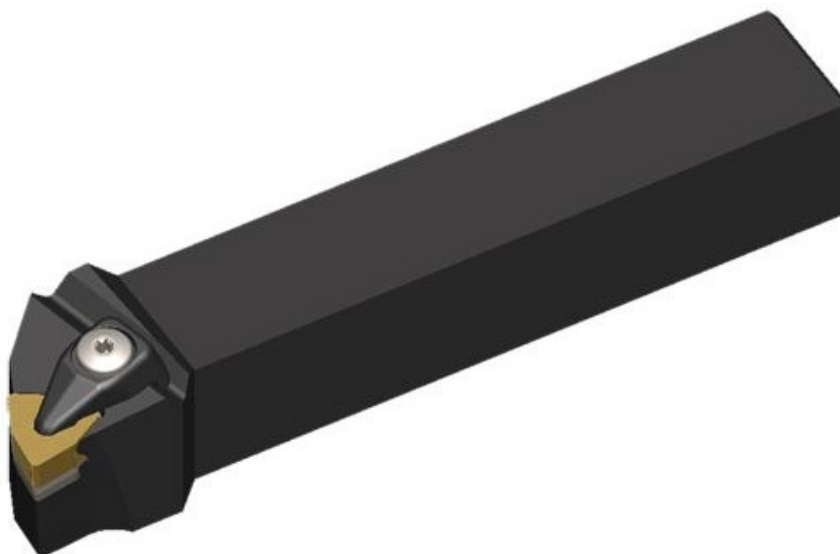
VBD typu WNMG má omezení pro maximální hloubku řezu a to do 5 mm, které

experiment splňuje.

Poznámka: Ve světě jsou pro podobný typ operací stále nejvíce používané VBD pro soustružení CNMG 12 (údaj výrobce Pramet Tools).

Povlak VBD byl vybrán na základě tvrdosti obráběného materiálu a to T9315 pro kalenou ocel (62 HRC) a povlak T9310 (23 HRC) pro nekalený materiál. U VBD výrobce ISCAR je nanesen povlak podobného chemického složení pro kalenou ocel značen IC 8150.

VBD byly při experimentech upnuty do nožového držáku typu DWLNR 2525 M08, který byl zvolen s ohledem na střední hrubování a také vzhledem k jeho vysoké tuhosti, v porovnání s upnutím VBD pomocí šroubu.



Obr. 7.11 Použitý nožový držák – DWLNR 2525 M08

Následující tabulka ukazuje doporučení řezné podmínky výrobcem nástroje pro daný typ obrábění (výrobní prostředí, stabilita a tuhost upnutí, typ hrubování – střední, obrobiteľnosť obrobku).

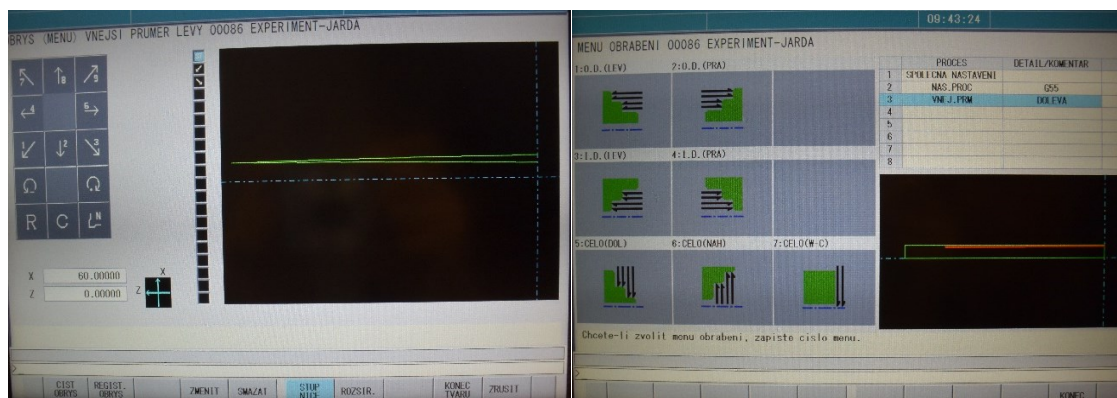
Tabulka 3 Doporučené řezné podmínky výrobcem nástroje

Řezné nástroje použité při experimentu					
označení destičky	výrobce	povlak	doporučené řezné podmínky výrobcem nástroje		
			v_c [m·min ⁻¹]	a_p [mm]	f [mm]
WNMG 080408 E-FM	Pramet	T 9315	280	2,5	0,3
WNMG 080408-PP	Iscar	IC 8150	280	3	0,3
WNMG 080408 E-FM	Pramet	T 9310	260	2,5	0,3

7.4 Programování drah nástroje

Pro sestrojení drah nástroje při experimentu bylo využito dialogového programování (MAPPS IV) v řídicím systému Mitsubishi M730BM obráběcího stroje, viz. *Obr. 7.12*.

Vzhledem ke zvolené strategii – obrábění s vytvářením kuželové plochy, nebylo nutné programování off-line s využitím CAD/CAM systémů. Dialogové programování je v tomto případě efektivnější a rychlejší.



Obr. 7.12 Dialogové programování (MAPPS IV) v řídicím systému Mitsubishi M730BM použité při experimentu

8. POSTUP EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI

Experimenty byly provedeny na materiálu 19 573, který byl k dispozici ve stavu žíhán na měkko i zakalený v celém objemu viz. *Tabulka 4*

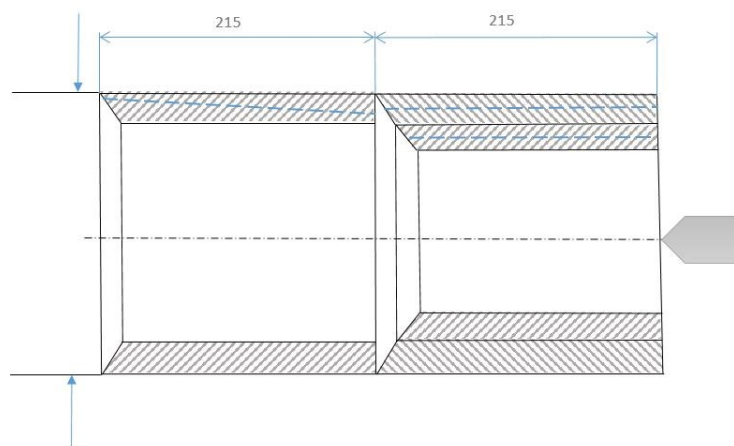
Výchozí tvar obrobku byla tyč o průměru 150 mm a délky 1 000 mm. Tyč byla rozdělena na dvě části z důvodu omezení maximální délky obrábění na stroji. Při experimentální části byl obráběný materiál upnut pomocí hrubovacích čelistí ve sklíčidle a podepřen otočným hrotem.

Tabulka 4 Přehled tvrdosti obráběných materiálů

Obráběný materiál	Tepelné zpracování	Tvrdost
		HRC
19 573	Žíhán na měkko	23
19 573	Zakalený v celém objemu	62

Experiment se prováděl s použitím doporučených řezných podmínek od výrobce (tzv. startovní řezné podmínky), které se před samotným experimentem odzkoušely při provedení několika zkušebních řezů s různými obměnami řezných podmínek, viz. schéma na *Obr. 8.2* a *Obr. 8.3*. Řezné podmínky použité v experimentálních částech udávají *Tabulky 5, 6*.

Pro adekvátní porovnání se u obou zkoumaných strategií zachovávaly stejné řezné podmínky. Postupně se tříska ubírala při podélném soustružení o délce úběru 215 mm, kdy nejprve byla aplikována strategie s konstantní hloubkou řezu při řezných podmínkách ($v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 2 \text{ mm}$, $f = 0,4 \text{ mm}$), než byl dosažen průměr obráběného materiálu 60 mm viz. *Obr. 8.1*. Následně byla aplikována strategie s proměnou hloubkou řezu – s vytvářením kuželové plochy, která začínala na stejném průměru 150 mm, jen ubíraná část byla posunuta o 215 mm, které byly již obrobené z předchozích záběrů se standardní strategií s konstantní hloubkou řezu.



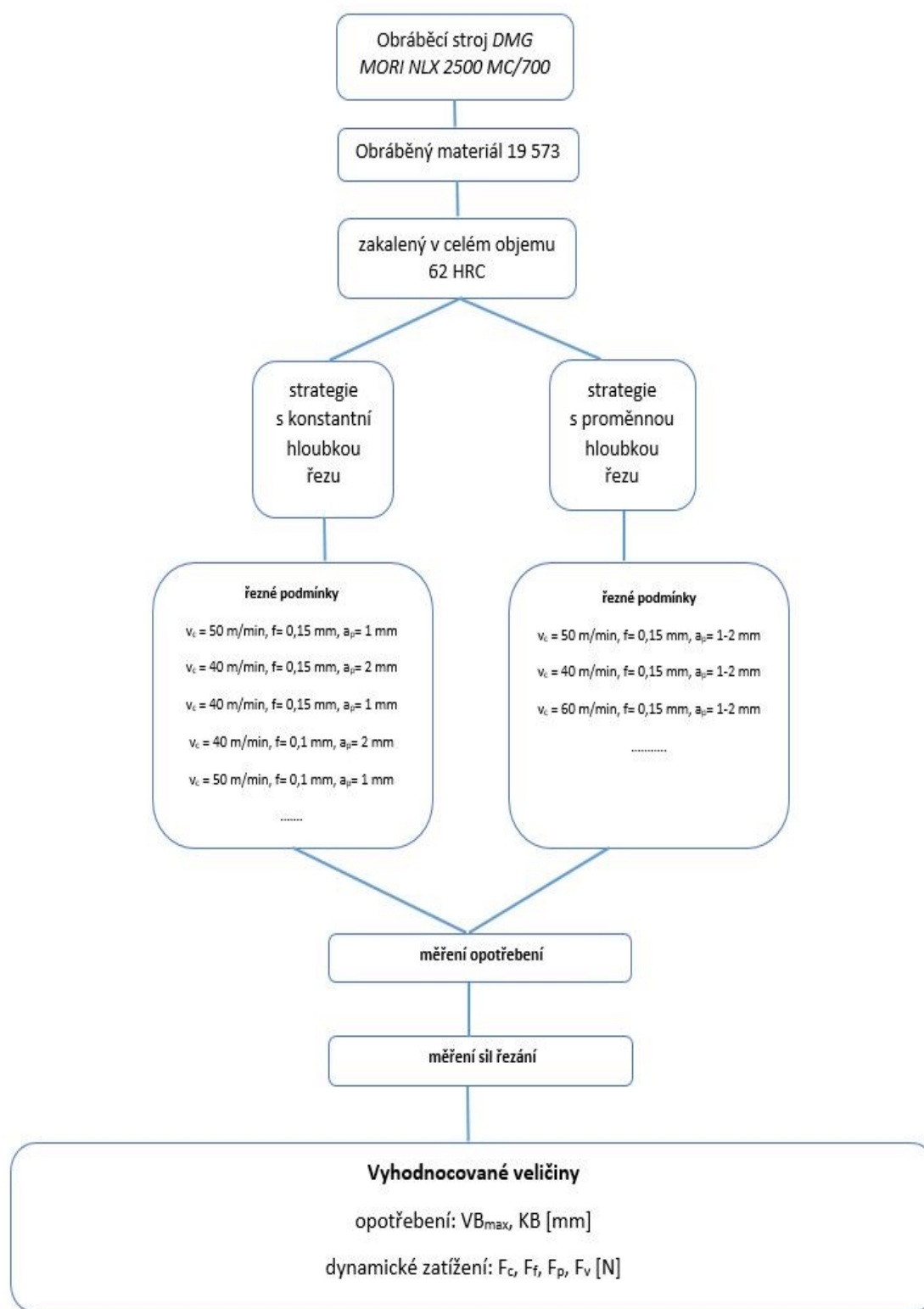
Obr. 8.1 Schéma postupu experimentu

V průběhu obrábění se snímaly složky řezných sil a pořizovaly záběry aktuálního opotřebení nástroje ve stanovených časových intervalech.

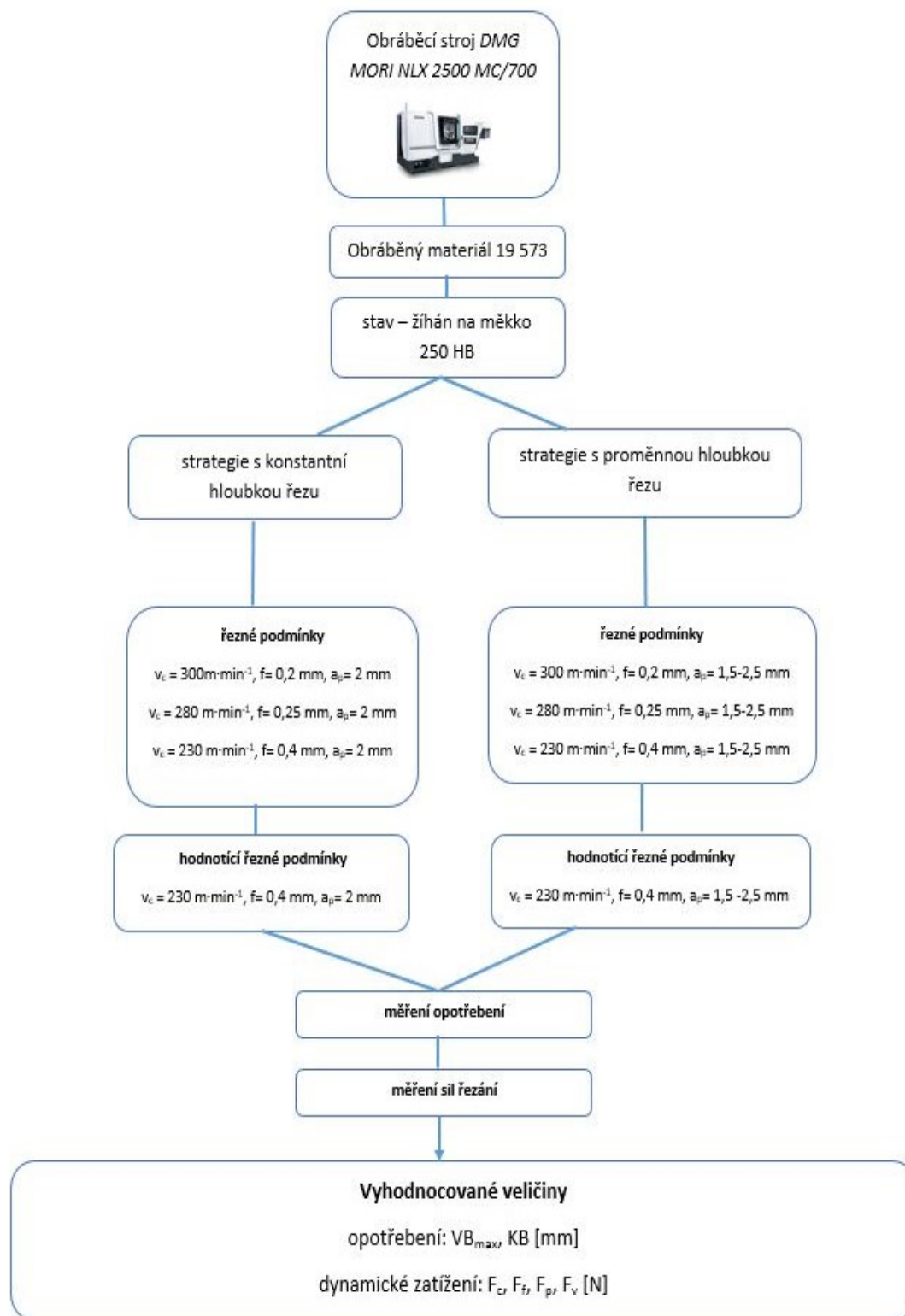
V průběhu obrábění byly měřeny hodnoty drsnosti parametrů Ra , Rz avšak s ohledem na praktické využití pro střední hrubování zde nebudou výsledky uvedeny. Výsledky měření drsnosti povrchu o obou porovnávaných strategiích odpovídaly stavu opotřebení nástroje, tj. se zvyšujícím opotřebením drsnost stoupala podobně u obou strategií. Při maximálním opotřebení byly naměřeny hodnoty u obou strategií okolo $Ra = 4 \mu\text{m}$ a $Rz = 15 \mu\text{m}$.

Všechny uvedené experimenty, u kterých bylo prováděno měření řezných sil, se prováděly bez použití procesní kapaliny, pro zamezení možného poškození dynamometru.

Na schématu Obr. 8.2 je znázorněno obrábění materiálu 19 573 v zakaleném stavu. Na obrázku Obr. 8.3 jsou znázorněny řezné podmínky, za kterých byly vykonány experimentální měření na nezakaleném materiálu 19 573, které následně byly podrobně analyzovány v následujících kapitolách této práce.



Obr. 8.2 Schéma experimentu u zakaleného materiálu 19 573

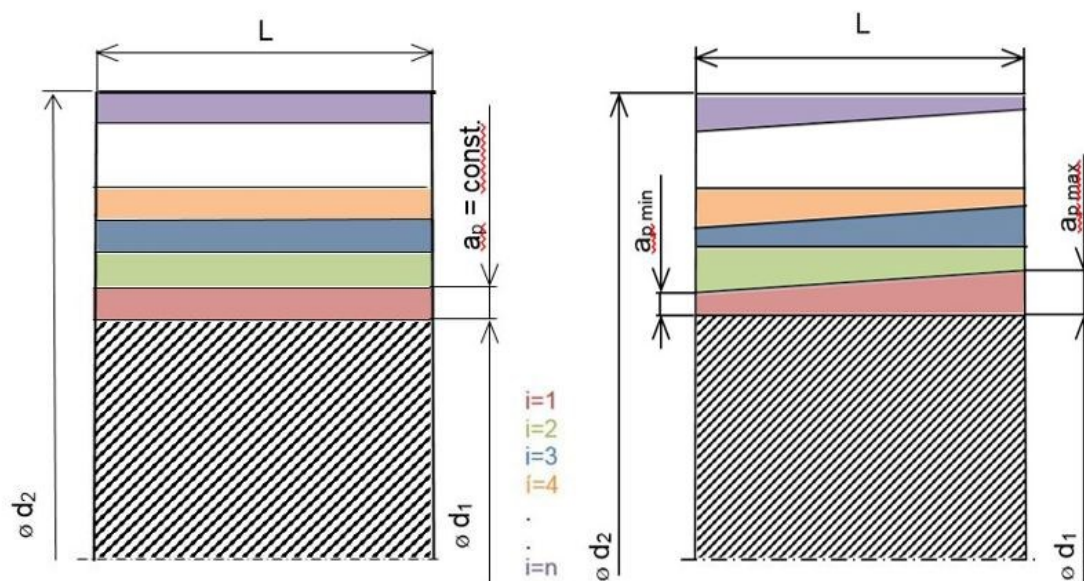


Obr. 8.3 Schéma experimentu u materiálu 19 573 ve stavu žihán na měkko

9. OPOTŘEBENÍ ŘEZNÉHO NÁSTROJE PŘI PODÉLNÉM SOUSTRUŽENÍ S KONSTANTNÍ A PROMĚNNOU HLOUBKOU ŘEZU

Jak již bylo dříve zmíněno, cílem disertační práce je porovnání opotřebení VBD při různých strategiích obrábění. V této kapitole se ve vztahu k opotřebení řezného nástroje porovnávají tyto dvě strategie obrábění:

- **strategie s konstantní hloubkou řezu** – běžně používaná Obr. 3.7 a Obr. 9.1 a kapitola 3 - *Analýza Současného stavu dané problematiky*.
- **strategie s vytvářením kuželové plochy** – popis a schéma viz kapitola 4 – *Návrh efektivních hrubovacích cyklů soustružení a viz. Obr. 4.2 a Obr. 9.1.*



Obr. 9.1 Schéma experimentu

9.1 Rozbor opotřebení u materiálu 19 573 po tepelné úpravě kalení

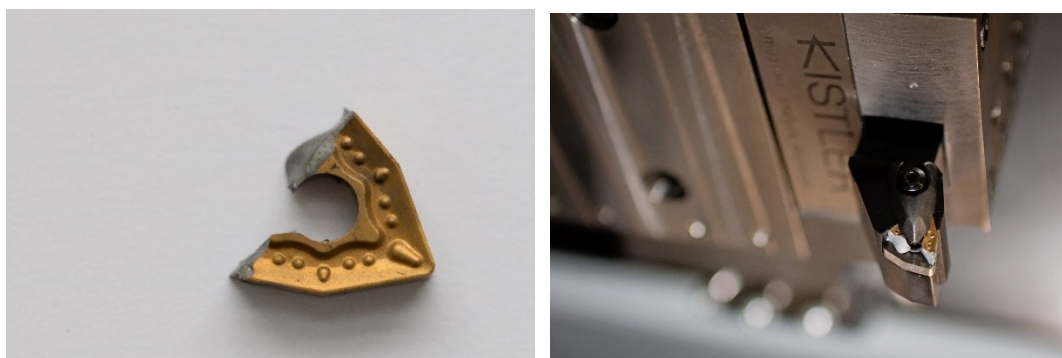
Vzhledem k vysoké tvrdosti u materiálu 19 573 62 HRC, které již spadá do oblasti tzv. tvrdého obrábění, byly zvoleny řezné podmínky tak, aby:

- správně fungoval utvařeč třísky na VBD,
- byly zachovány doporučené řezné podmínky.

Řezný nástroj vykazoval nadměrné opotřebení ve formě destrukce břitu (křehký lom, plastická deformace). VBD nebyla schopna za zmiňovaných doporučených podmínek řezat.

U zakaleného materiálu 19 573 docházelo téměř k okamžité destrukci VBD vylomením špičky, vydrolení břitu, nebo vylomením břitu a to u různých řezných podmínek, které byly vyzkoušeny viz. *Tabulka 5* a *Obr. 9.2*. Při daných výsledcích by nebylo přínosné v experimentech pokračovat s řezným materiálem ze SK.

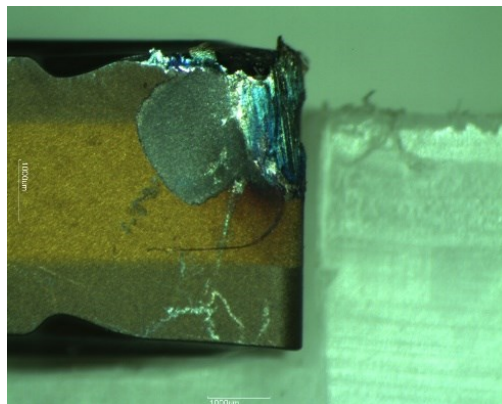
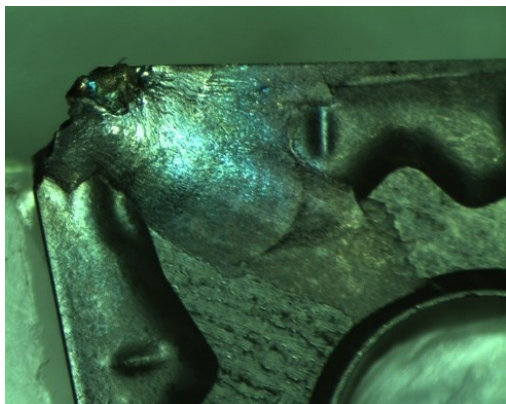
Pořízený snímek vybrané VBD v čase $t_s = 1$ min po soustružení zakaleného materiálu 19 573 *Obr. 9.2*, *Obr. 9.3* a *Obr. 9.4* značí křehký lom, tedy destrukci řezného materiálu.



Obr. 9.2 Vyštipnutá VBD při $t_s = 1$ min. obrábění kaleného materiálu 19 573

Tabulka 5 Startovní řezné podmínky (obráběný materiál 19 573, 62 HRC)

materiál	strategie	řezný materiál	řezné podmínky		
			řezná rychlost [m·min ⁻¹]	hloubka řezu [mm]	posuv [mm]
19 573 62 HRC	konstantní a_p	typ VBD: WNMG 080408 E-FM; povlak T9310, Pramet tools	50	1	0,15
			40	2	0,15
			40	1	0,1
			40	2	0,1
			30	1	0,1
			50	1	0,1
		typ VBD: WNMG 080408-PP, ISCAR	50	1	0,1
			40	1	0,1
			80	1	0,1
	proměnná a_p	typ VBD: WNMG 080408 E-FM; povlak T9310, Pramet tools	50	1	0,15
			40	1 až 2	0,15
			60	1 až 2	0,15



Obr. 9.3 Vyštipnutá špička na čele Obr. 9.4 Destrukce VBD – hřbet
(materiál 19 573 – tvrdost 62 HRC, $v_c = 50 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 1 \text{ mm}$, $f = 0,1 \text{ mm}$)

9.2 Rozbor opotřebení u nekaleného materiálu 19 573

Následující Tabulka 6 uvádí řezné podmínky použité v experimentální části.

Tabulka 6 Řezné podmínky v experimentálních částech (obráběný materiál 19 573 - tepelně nezpracovaný)

materiál	strategie	řezný materiál	řezné podmínky		
			řezná rychlost [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	hloubka řezu [mm]	posuv [mm]
19 573	konstantní a_p	typ VBD: WNMG 080408 E-FM; povlak T9315, Pramet tools	300	2	0,2
			280	2	0,25
			230	2	0,4
	proměnná a_p	typ VBD: WNMG 080408 E-FM; povlak T9315, Pramet tools	300	1,5-2,5	0,2
			280	1,5-2,5	0,25
			230	1,5-2,5	0,4

Pro podrobnější rozbor a zhodnocení opotřebení břitu a sil řezání byl vybrán soubor hodnot za následujících stěžejních řezných podmínek, viz. Tabulka 7.

Tabulka 7 Řezné podmínky použité pro podrobné zhodnocení

Řezné podmínky			Soustružení	
veličina	označení	jednotky	s konstantní hloubkou řezu	s proměnnou hloubkou řezu
řezná rychlost	v_c	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]	230	230
posuv	f	[mm]	0,4	0,4
hloubka řezu	a_p	[mm]	2	1,5 až 2,5
procesní kapalina	-	-	ne	ne

Cílem analýz a rozborů je zachování konstantních řezných podmínek pro porovnání obou strategií obrábění. Řezný nástroj, obráběcí stroj, materiál, rozměry obrobku jsou uvedeny v kapitole 7 Praktická realizace experimentálních částí.

Následující tabulka (*Tabulka 8*) porovnává opotřebení hřbetu VBD u zkoumaných strategií. Porovnává velikost naměřené hodnoty VB_{\max} – maximální opotřebení hřbetu nástroje v závislosti na čase.

Tabulka 8 Porovnání opotřebení hřbetu VBD u zkoumaných strategií

Čas obrábění	Konstantní hloubka řezu	Proměnná hloubka řezu
[min]	hodnota opotřebení VB_{\max} [mm]	hodnota opotřebení VB_{\max} [mm]
1,9	0,205	0,21
3,4	0,239	0,3
4,8	0,31	0,39
6,2	0,6	0,41
8,2	-	0,6

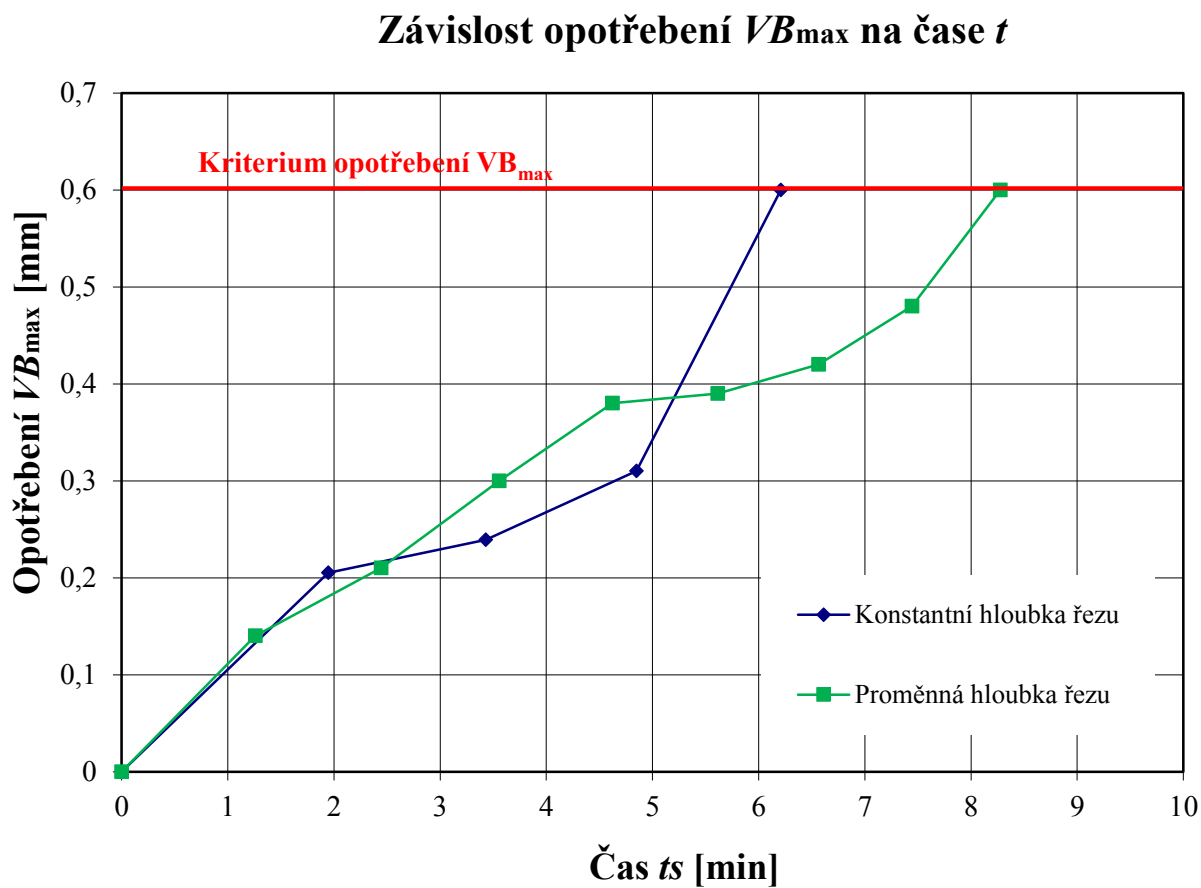
U konstantní hloubky řezu lze pozorovat, stejně jako u proměnné hloubky řezu poměrně typickou I. oblast zrychleného záběhového opotřebení, které obecně souvisí se záběhem stroje a je způsobeno vysokým měrným tlakem na vrcholcích nerovností nástroje.

U proměnné hloubky řezu byl z počátku nárůst opotřebení VB_{\max} mírně strmější v porovnání se strategií s konstantní hloubkou řezu. V oblasti lineárního opotřebení (II. oblast) strategie s proměnnou a_p setrvává delší strojní čas, v porovnání se standardní strategií s konstantní a_p (*Obr. 9.5*).

Do předem stanoveného kritéria opotřebení $VB_{\max} = 0,6$ mm se opotřebení VBD strategií s konstantní hloubkou řezu dostalo v čase obrábění $t_s = 6,2$ minut.

U strategie s proměnnou hloubkou řezu bylo dosaženo kritéria opotřebení $VB_{\max} = 0,6$ mm po čase $t_s = 8,2$ min.

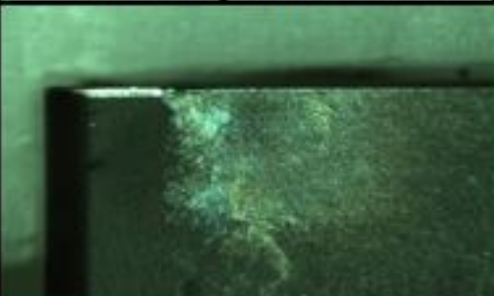
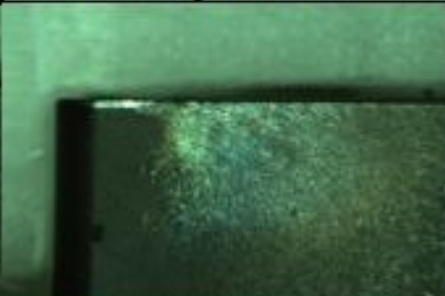
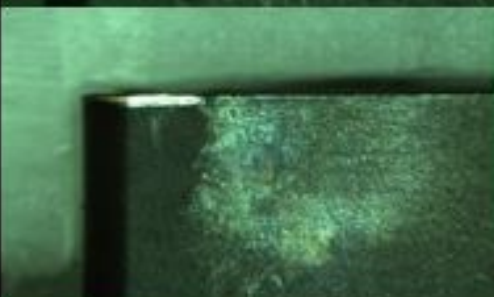
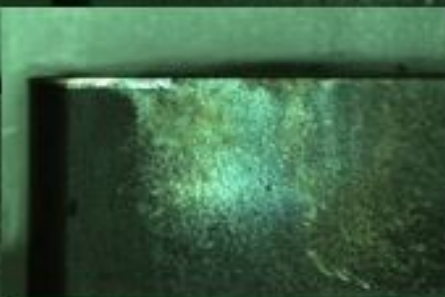
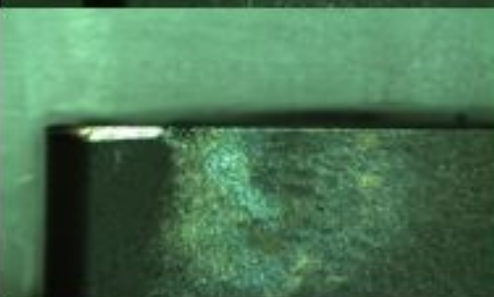
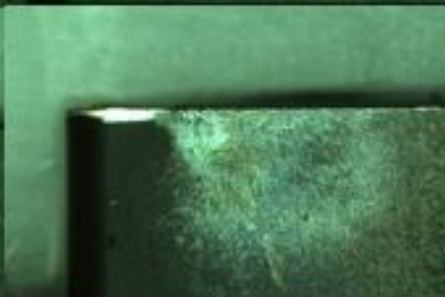
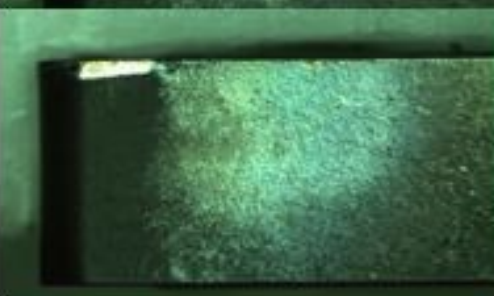
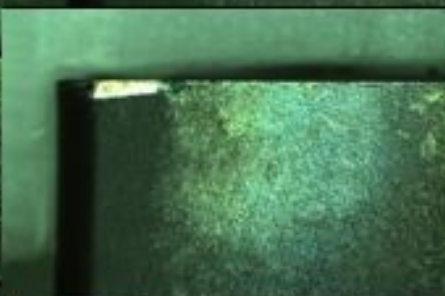
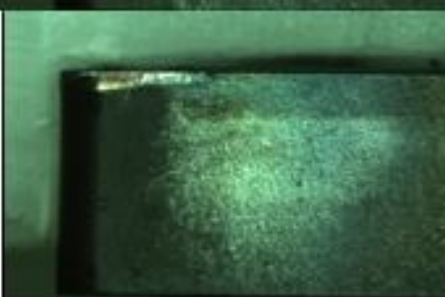
Trvanlivost řezné hrany VBD se tedy změnou strategie obrábění prodloužila o 2 minuty v záběru.



Obr. 9.5 Závislost opotřebení VB_{\max} na čase t u konstantní a proměnné hloubky řezu

Následující tabulka graficky znázorňuje porovnání opotřebení nástroje VB_{\max} v závislosti na čase u zkoumaných strategií.

Tabulka 9 Porovnání snímků opotřebení břitu u zkoumaných strategií

Čas obrábění [min]	Konstantní hloubka řezu snímek opotřebení VB	Proměnná hloubka řezu snímek opotřebení VB
1,9		
3,4		
4,8		
6,2		
8,2		

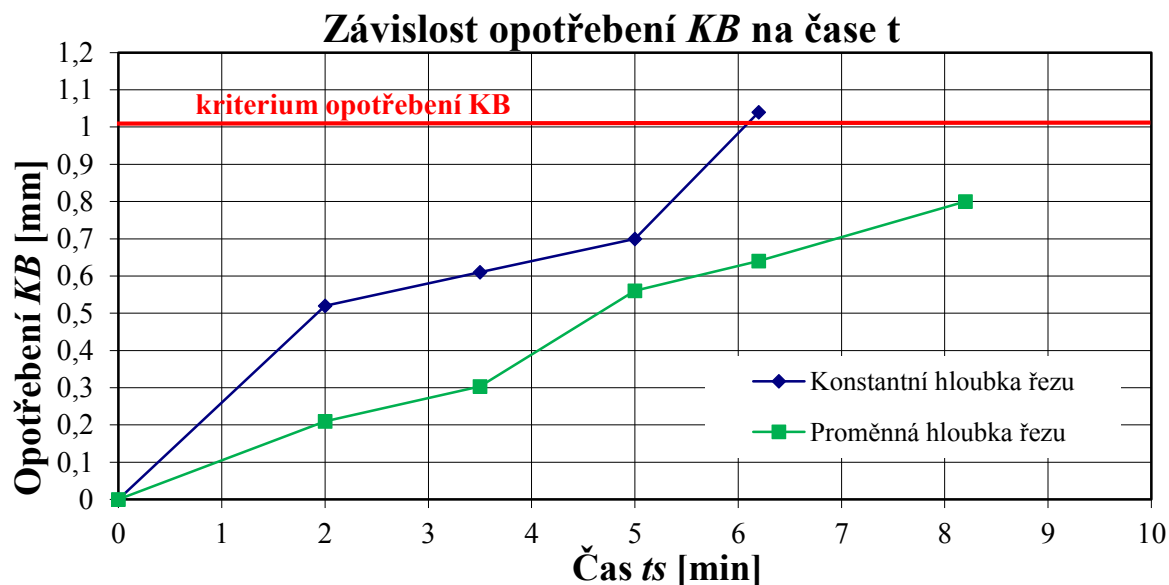
Tabulka 10 Porovnání hodnot KB opotřebení čela u zkoumaných strategií

Čas obrábění	Konstantní hloubka řezu	Proměnná hloubka řezu
[min]	hodnota opotřebení KB [mm]	hodnota opotřebení KB [mm]
1,9	0,52	0,21
3,4	0,61	0,303
4,8	0,7	0,56
6,2	1,04	0,64
8,2	-	0,8

Při zkoumání opotřebení na čele nástroje bylo stanoveno kritérium opotřebení šířky výmolu na čele nástroje $KB = 1$ mm. Tato hodnota byla dosažena pouze u strategie s konstantní hloubkou řezu.


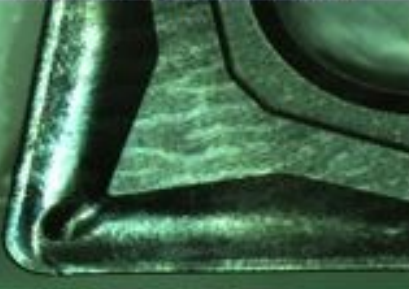







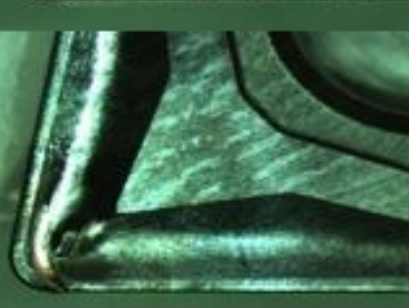
Z grafu na obrázku Obr. 9.6 je patrné, že při použití strategie s konstantní hloubkou řezu probíhá opotřebení na čele KB, která značí šířku žlábků na čele, v celém časovém intervalu s většími hodnotami (v porovnání se strategií s proměnnou a_p). Strategie s konstantní a_p dosáhla dříve stanoveného kritéria opotřebení na čele a tím i ukončení životnosti vyměnitelné břitové destičky.

Naopak břitová destička s aplikací strategie s proměnnou a_p vydržela v řezu o dvě minuty déle. Kritéria opotřebení KB nebylo dosaženo.

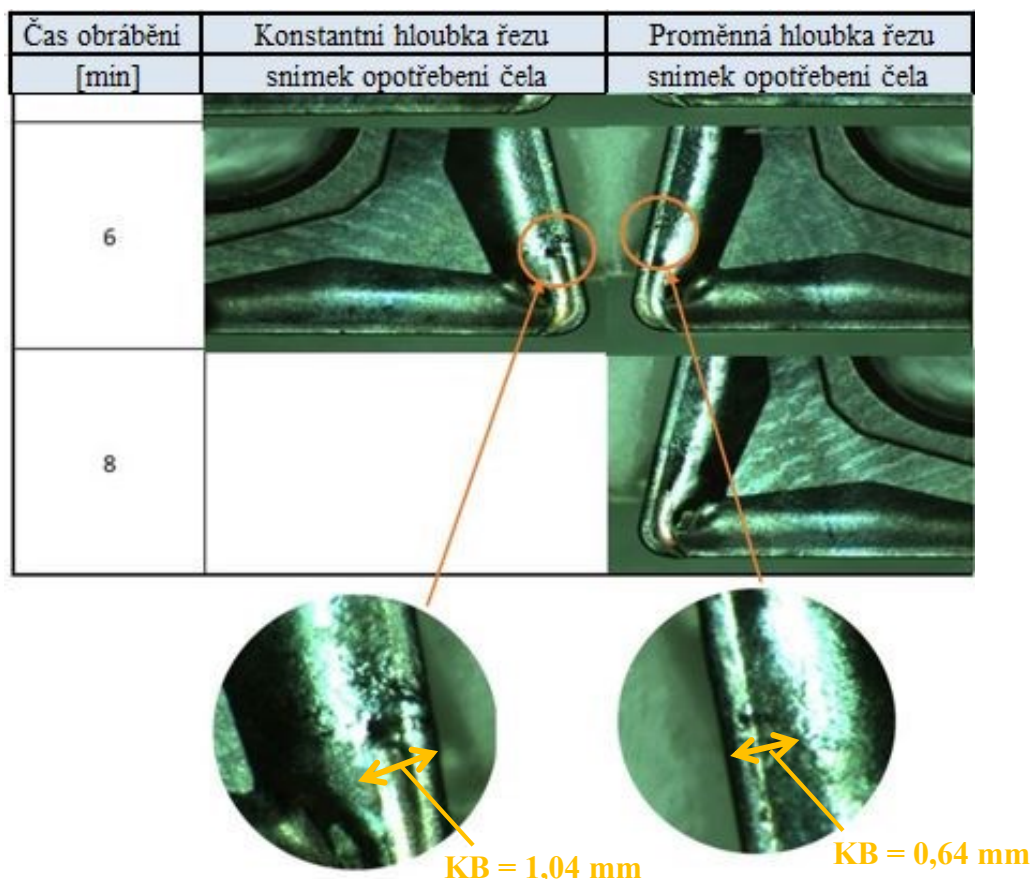


Obr. 9.6 Závislost opotřebení na čase t u konstantní a proměnné hloubky řezu

Tabulka 11 Detail opotřebení čela v daném čase u různých strategií obrábění

Čas obrábění [min]	Konstantní hloubka řezu snímek opotřebení čela	Proměnná hloubka řezu snímek opotřebení čela
1,9		
3,4		
4,8		
6,2		
8,2		

Z pořízených snímků (*Tabulka 11*) a zejména z vyříznutých detailů (*Obr. 9.7*) je patrné rozsáhlejší opotřebení na čele *KB* u strategie s konstantní hloubkou řezu.



Obr. 9.7 Detail čela nástroje při obrábění s konstantní (vlevo) a proměnnou hloubkou řezu (vpravo)

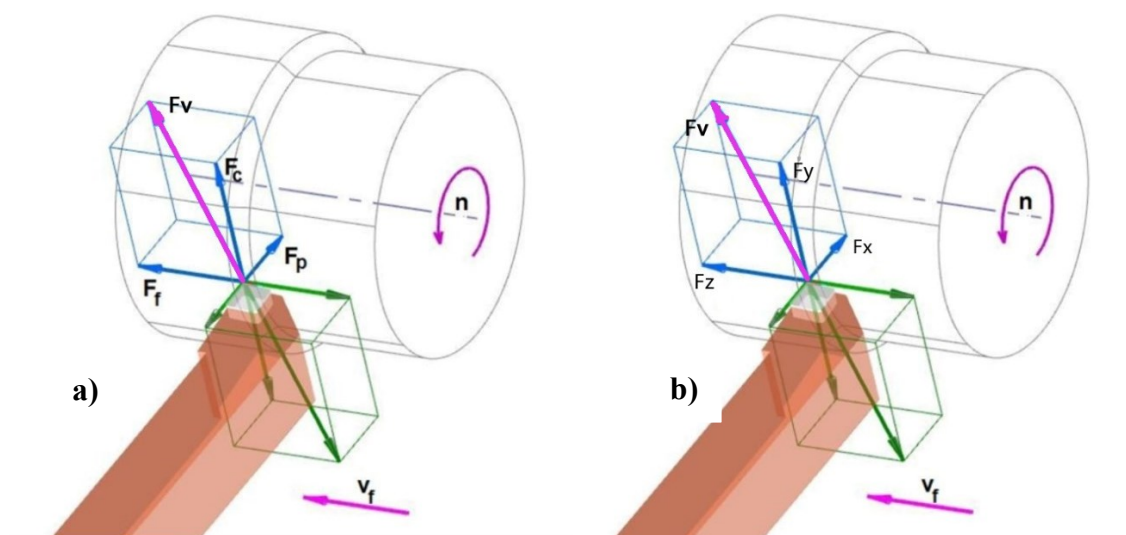
9.3 Celkové zhodnocení opotřebení při obrábění s různými strategiemi obrábění

Cílem kapitoly je zhodnotit průběh opotřebení u dvou různých strategií obrábění. Experimenty s použitím hrubovacího cyklu s proměnnou hloubkou řezu, přinesly výsledky v podobě zvýšení trvanlivosti řezného břitu. Experiment byl proveden za použití VBD tvaru *W* ze slinutého karbidu, který je náchylný tvorbě rýh na hřbetě a čele nástroje (viz. *Kapitola 6 - Opotřebení břitu řezných nástrojů*). Cílem bylo tyto rýhy opotřebení rozmístit do delší části řezného nástroje a snížit tak nejen velikost rýhy opotřebení VB_N , ale i hodnotu opotřebení VB_{max} a šířku výmolu na čele *KB* a hloubku výmolu *KT*. Zvýšení trvanlivosti řezného břitu lze vysvětlit za pomoci teoretických poznatků o opotřebení nástroje.

10. SÍLY ŘEZÁNÍ PŘI PODÉLNÉM SOUSTRUŽENÍ S KONSTANTNÍ A PROMĚNNOU HLOUBKOU ŘEZU

V této kapitole jsou uvedena experimentální měření výzkumu sil řezání pro porovnání soustružení s konstantní hloubkou řezu a proměnnou hloubkou řezu. Pro měření bylo využito třísložkového dynamometru Kistler 9129AA.

Následující obrázky ukazují upnutí dynamometru na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500 MC/700 se značením směru měření složek sil dynamometru korespondujících se složkami sil podélného soustružení.



Obr. 10.1 ad a) Působení jednotlivých složek sil u soustružení [30]
ad b) Nastavení souřadného systému při vlastním měření u dynamometru

Působení jednotlivých složek sil řezání při vlastním měření se určuje umístěním dynamometru na stroji. Vzhledem ke snazšímu vyhodnocování i zpracování dat mezi jednotlivými programy, byl zachován jednotný souřadný systém směru působení jednotlivých složek sil řezání. Směr jednotlivých os dynamometru je nastaven tímto způsobem, viz Obr. 10.2.

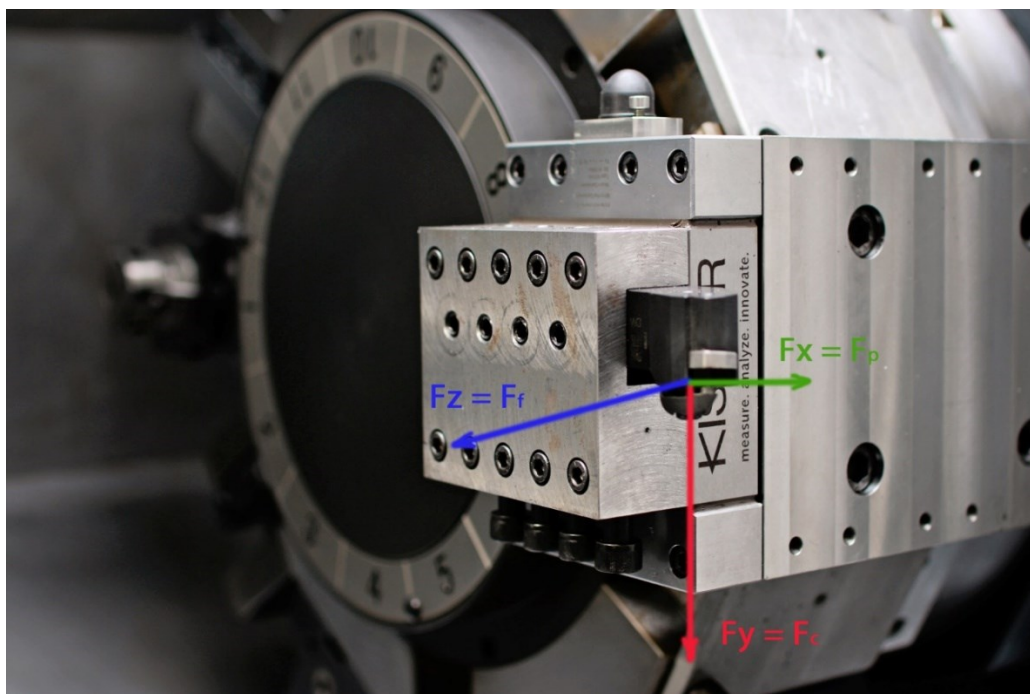
F_x složka síly řezání působící kolmo k ose obrobku – vyjadřující pasivní (radiální) složku síly řezání F_p ,

F_y složka síly řezání působící tangenciálně – vyjadřující řeznou složku síly řezání

F_c ,

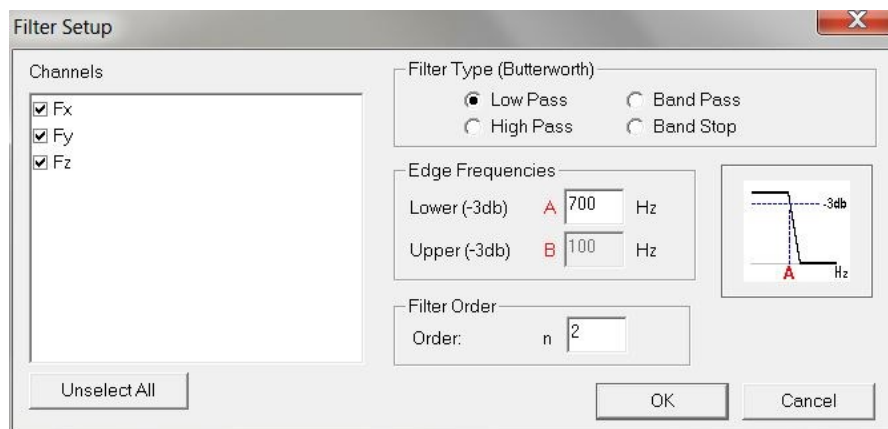
F_z složka síly řezání působící ve směru posuvu – vyjadřující posuvovou složku síly

řezání F_f .



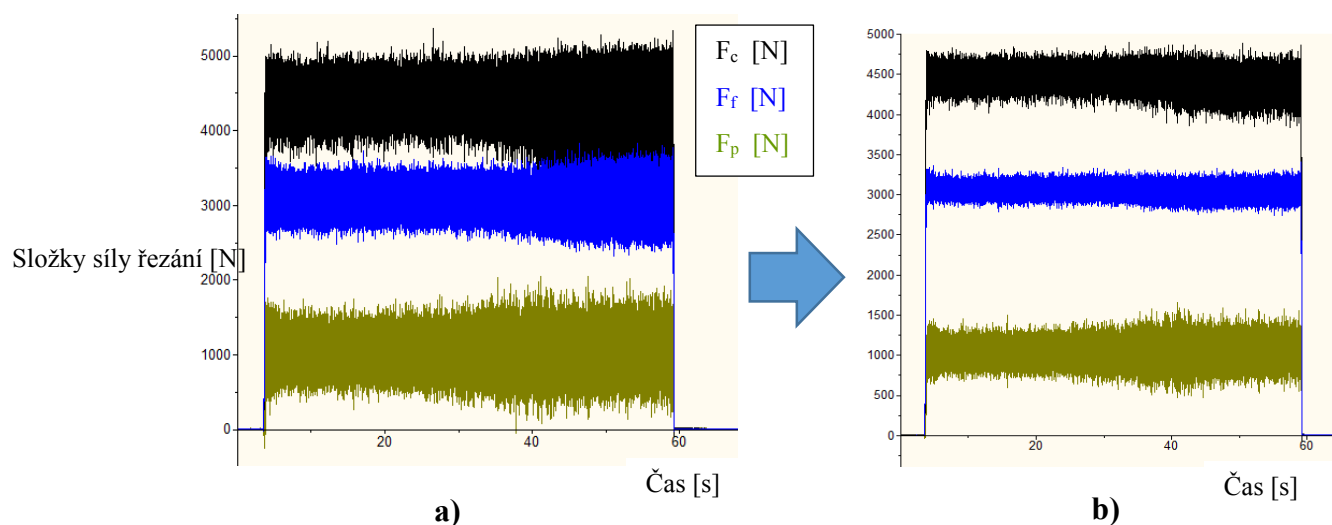
Obr. 10.2 Upnutí dynamometru na soustružnickém centru DMG MORI NLX 2500 MC/700 se zaznačením směru měření složek sil

Při měření byla nastavena vysoká vzorkovací frekvence dynamometru 10 000 Hz. Tato frekvence udává počet vzorků za jednotku času načítaných ze spojitého analogového signálu. Nastavení vysoké vzorkovací frekvence udává přesnost analýzy silového zatížení. To poskytuje větší množství naměřených dat. Tyto záznamy obsahují nevypovídající data, která je nutné odstranit pomocí filtrace. Při vyhodnocování měření byla data v softwaru Dynoware filtrována pomocí funkce Low Pass, viz. Obr 10.3. Při této filtraci jsou znázorněny jen frekvence před zadanou hodnotou. Vzhledem ke specifikaci snímačů bylo výrobcem doporučeno sledovat hodnoty frekvencí do 700 Hz. A to vzhledem k vlastním frekvencím dynamometru.



Obr. 10.3 Filtrace dat v softwaru Dynoware

Následující obrázek ukazuje rozdíl zobrazených dat před softwarovou filtrací ad a) a po použití filtrace ad b). Na obrázku jsou znázorněny tři měřené složky síly řezání v průběhu jedné minuty řezu. Po tomto časovém intervalu byl řez přerušen pro změření opotřebení nástroje. Po filtraci se nezmění průměrné hodnoty jednotlivých složek. Změní se však rozkmity, které jsou sníženy.

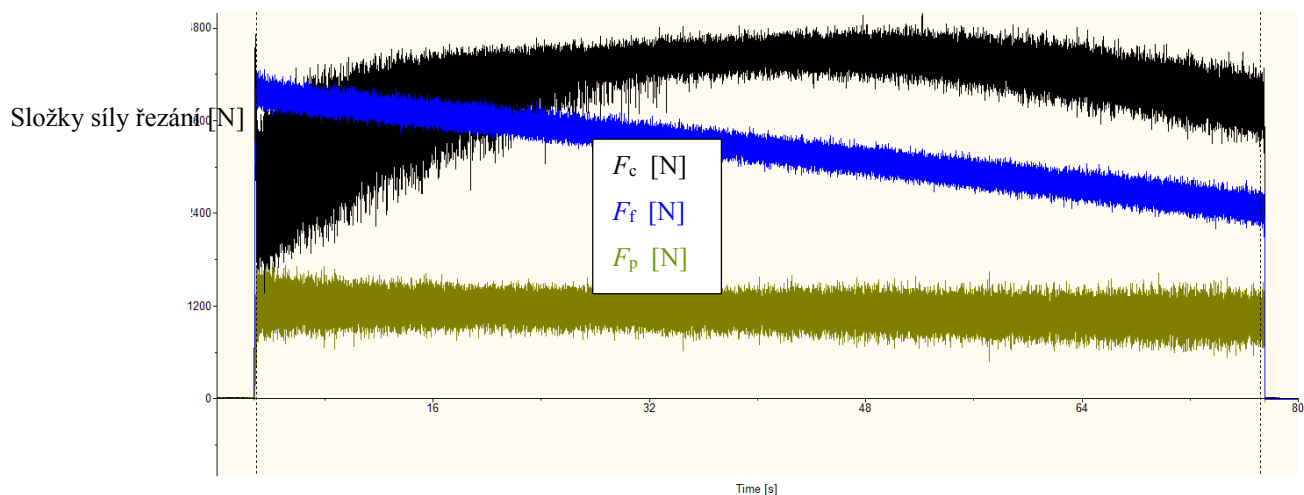


Obr. 10.4 Graf naměřených a) a filtrovaných b) složek sil řezání v závislosti na čase
 $(a_p = 2 \text{ mm}, f = 0,4 \text{ mm}, v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1})$

10.1 Analýza sil řezání v průběhu jednoho záběru nástroje

V analýze sil řezání je snaha diskutovat závislosti jednotlivých složek sil při podélném vnějším soustružení s konstantní hloubkou řezu ve srovnání s proměnlivou hloubkou řezu. Obecně platí, že závislost řezné složky F_c při soustružení má s rostoucím posuvem a hloubkou řezu stoupající tendenci, analogicky to platí i pro složky F_f a F_p .

Následující dva obrázky ukazují typický průběh naměřených složek sil řezání soustružení s proměnnou hloubkou řezu v průběhu prvního a druhého záběru. (tj. v průběhu 1. a 2. minuty řezu). *Obr. 10.5* ukazuje první záběr břitu VBD, kdy po dokončení řezu bylo změřeno opotřebení $VB = 0,205$ mm. Obrázek *Obr. 10.6* ukazuje 2. záběr, kdy po dokončení řezu bylo změřeno opotřebení $VB = 0,239$ mm. Je zde vidět plynulé zmenšování (nebo naopak zvětšování) posuvové složky F_f při zmenšování (nebo naopak zvětšování) hloubky řezu a_p . Pasivní složka tak strmý nárůst nevykazuje. Řezná složka síly vykazuje zvětšující se rozkmit při zvětšující se hloubce řezu. Detailnější rozbor ukazuje *Obr. 10.9*

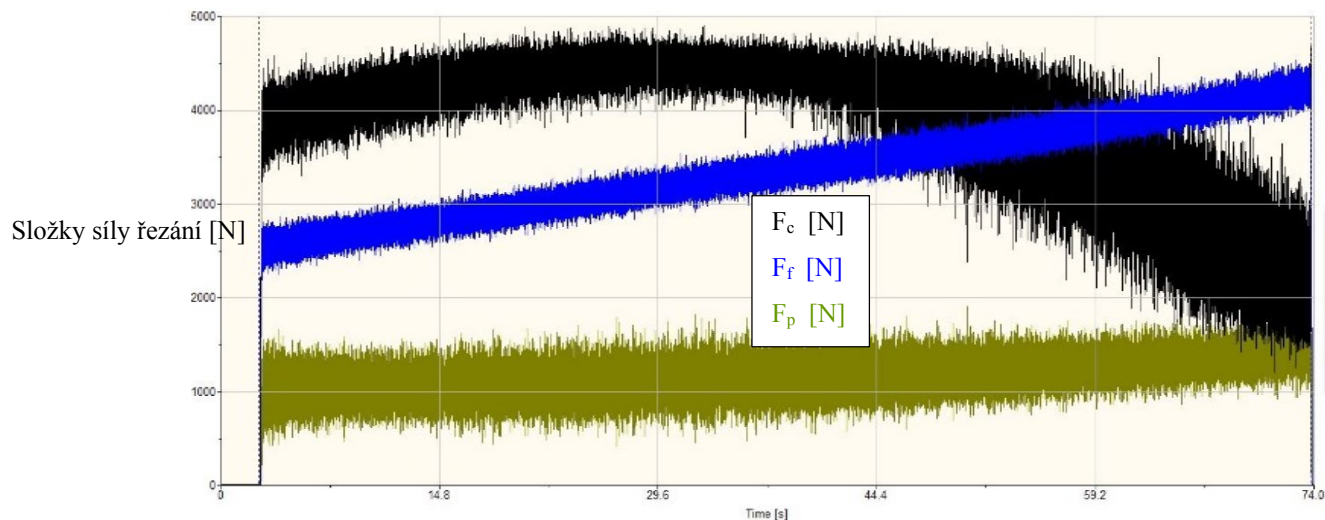


Obr. 10.5 Průběh složek sil řezání v průběhu 1. záběru při proměnné a_p

$$a_p = 2,5 \text{ až } 1,5 \text{ mm}, (f = 0,4 \text{ mm}, v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1})$$

Obrázek *Obr. 10.6* zobrazuje rozbor jednoho vybraného záběru (2. záběr) strategie s proměnnou hloubkou řezu, kdy hloubka řezu začíná na minimální hloubce $a_{p\min} = 1,5$ mm a končí $a_{p\max} = 2,5$ mm. Tento záběr reprezentuje celkový soubor naměřených dat a je záměrně vybrán s ohledem na velikost opotřebení VBD ($VB = 0,205$ mm po $t_s = 2,4$ min),

které je v oblasti rovnoměrného nárůstu opotřebení (II. oblast opotřebení).



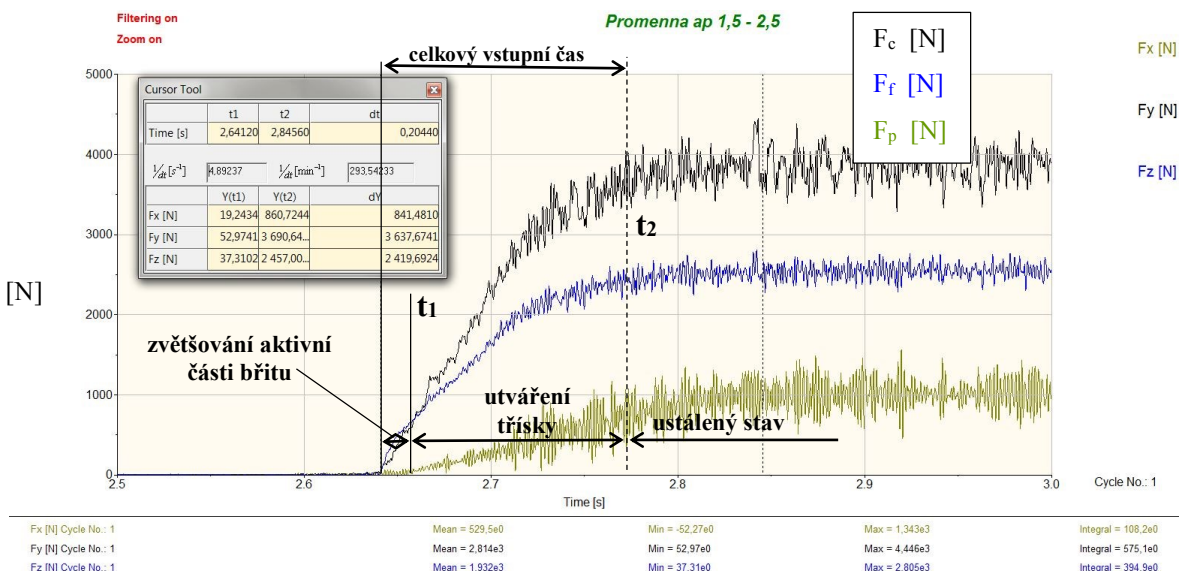
Obr. 10.6 Průběh složek sil řezání v průběhu 2. záběru při proměnné a_p

$$(a_p = 1,5 \text{ až } 2,5 \text{ mm}, f = 0,4 \text{ mm}, v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1})$$

Následně budou jednotlivé fáze a dílčí fáze vybraného řezu popsány a zhodnoceny. Následující obrázek ukazuje detailnější znázornění jednotlivých složek sil v průběhu vstupní fáze (nájezdu – vstupu do řezu). Při nájezdu-vstupu dochází k navýšení sil řezání. Vstup do řezu byl záměrně volen standartní, bez úprav dráhy či velikosti posuvu. Tuto vstupní fázi je možno rozdělit do 3 dílčích fází [42]:

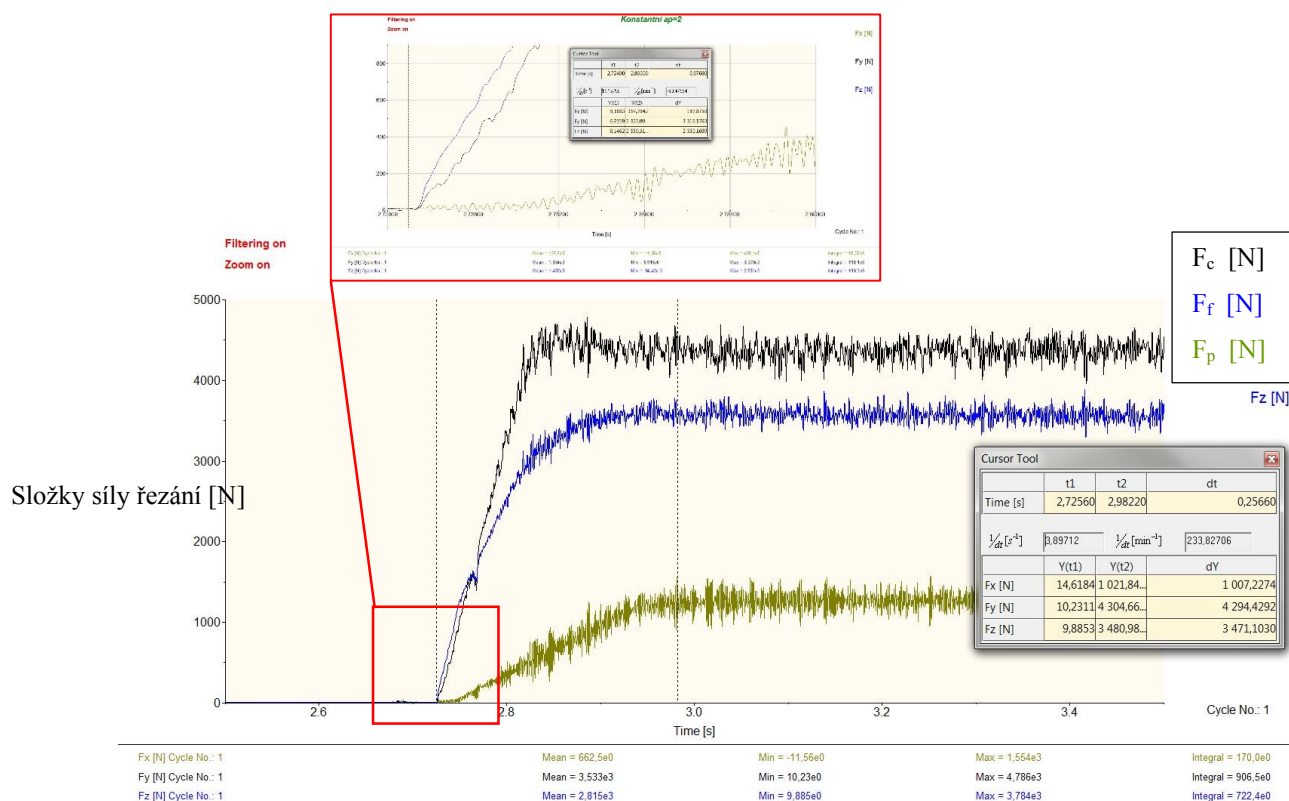
- počáteční plastická deformace,
- vývoj délky kontaktu,
- prodloužení délky kontaktu, dokud není dosaženo stacionární fáze.

Složky síly řezání [N]

Obr. 10.7 Průběh složek sil řezání v průběhu vstupní fáze řezu při proměnné a_p

$$(a_p = 1,5 \text{ až } 2,5 \text{ mm}, f = 0,4 \text{ mm}, v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1})$$

V průběhu počáteční dílčí fáze se geometrie obrobku přizpůsobuje geometrii řezného nástroje, a to prostřednictvím lokální deformace obrobku [42]. Celkový vstupní čas u proměnné a_p – čas dokud není docíleno ustáleného stavu je $t_{s(vst)} = 0,20$ s. Při porovnání s konstantní a_p lze dojít k závěru, že tyto průběhy jsou velice obdobné, viz. Obr. 10.8. Celkový vstupní čas je však u konstantní a_p vyšší o 0,05 s ($t_{s(vstc)} = 0,25$ s). Lze se domnívat, že je to dáno rozdílem velikostí vstupní hloubky řezu (u konstantní je $a_p = 2$ mm, u proměnné je $a_p = 1,5$ mm).



Obr. 10.8 Průběh složek sil řezání v průběhu vstupní fáze řezu při konstantní a_p

$$(a_p = 2 \text{ mm}, f = 0,4 \text{ mm}, v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1})$$

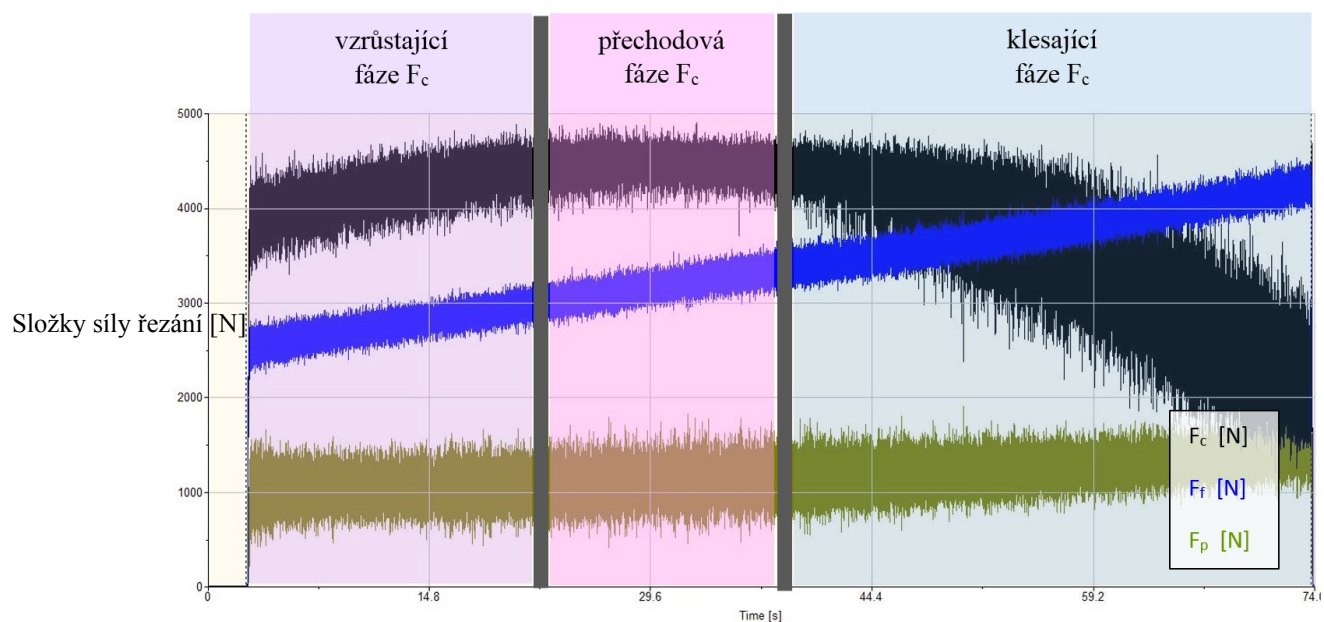
Další fází by dle teorie obrábění měla být fáze stagnace, kdy jednotlivé složky jen mírně vzrůstají v závislosti na opotřebení nástroje. Tuto fázi je však nutné rozdělit, s ohledem na průběh dominantní řezné složky při zvětšující se hloubce řezu, na další 3 dílčí fáze a to dle průběhu řezné složky. Možné rozdělení fáze řezu stagnace:

- dílčí fáze vzrůstající F_c ,
- dílčí fáze přechodová F_c ,
- dílčí fáze klesající F_c .

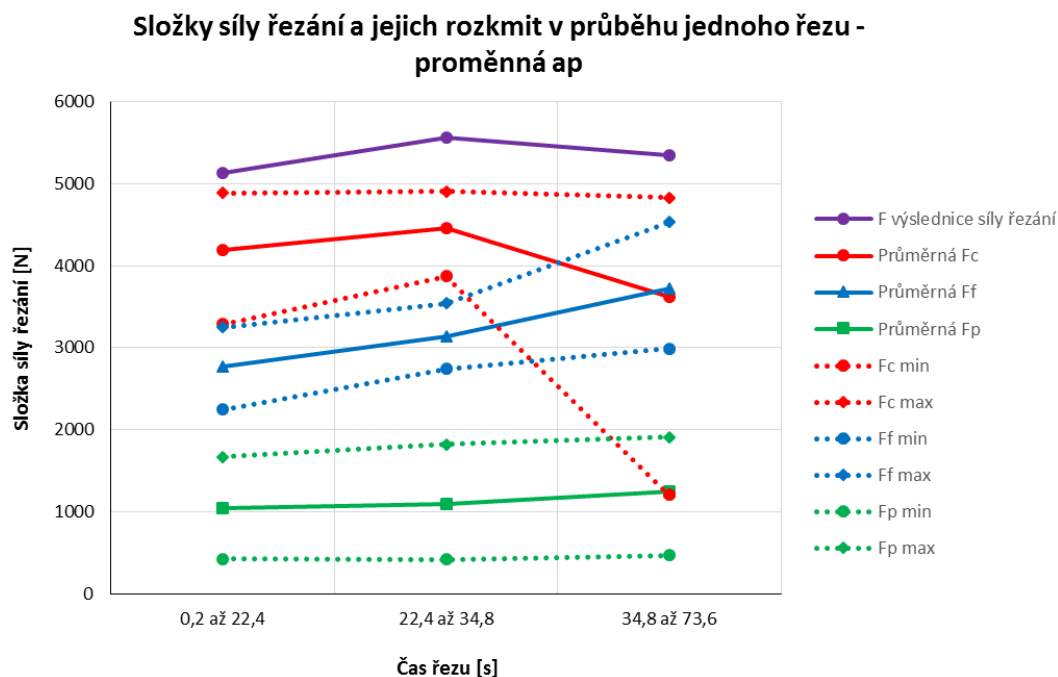
Tabulka 12 ukazuje časový rozbor řezu. Celkový strojní čas zkoumaného 2. řezu ($t_{s(i=2)} = 73,8 \text{ s}$) není podstatný, protože se u jiných řezů mírně odlišuje, zajímavé je procentuální podíl času v jednotlivých fázích řezu. Z tabulky je patrné, že klesající průběh řezné složky síly zaujímá nadpoloviční čas řezu. Tabulka s hodnotami jednotlivých složek sil a jejich rozkmity v průběhu jednoho řezu ($t_{s(i=2)}$) je uvedena v příloze č.2.

Tabulka 12 Procentuální podíl strojního času u vybraného řezu ($t_{s(i=2)}$)

Fáze řezu	Interval zkoumaného řezu [s]		Strojní čas zkoumaného řezu [s]	Procentuální podíl strojního času s celkového [%]
	od	do		
Vstupní	0	0,2	0,2	0,3
Vzrůstající F_c	0,2	22,4	22,2	30,1
Přechodová F_c	22,4	34,8	12,4	16,8
Klesající F_c	34,8	73,6	38,8	52,6
Výstupní	73,6	73,7	0,1	0,1
Suma			73,7	100



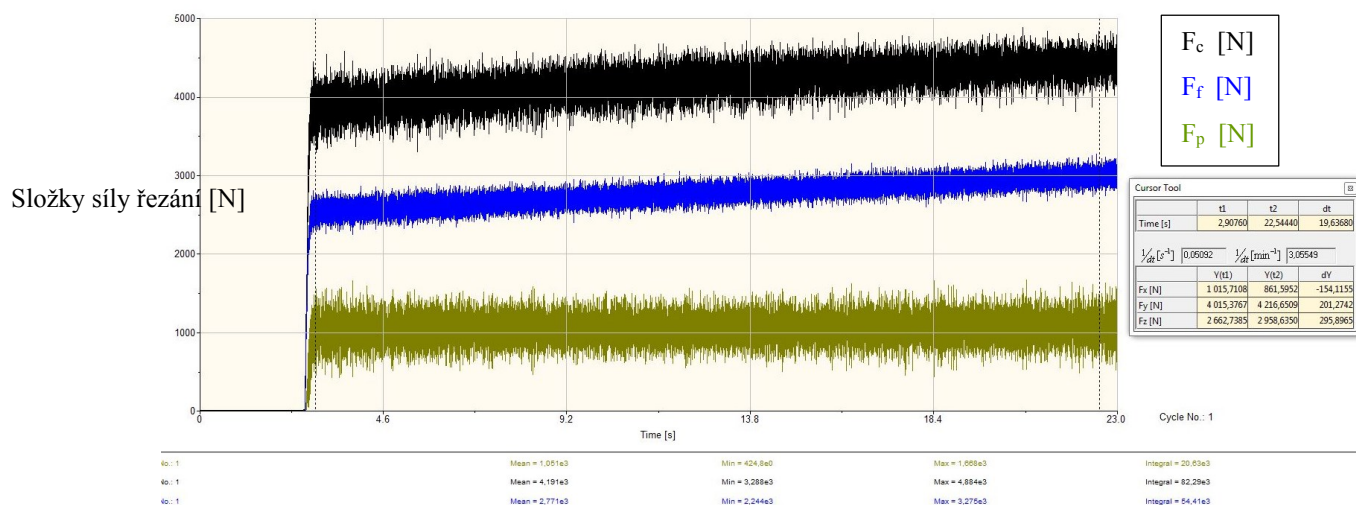
Obr. 10.9 Rozbor jednoho řezu s proměnnou a_p
 ($a_p = 1,5$ až $2,5$ mm, $f = 0,4$ mm, $v_c = 230$ m·min⁻¹)



Obr. 10.10 Složky síly řezání a jejich rozkmit v průběhu jednoho záběru s proměnnou a_p

$$(a_p = 1,5 \text{ až } 2,5 \text{ mm}, f = 0,4 \text{ mm}, v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1})$$

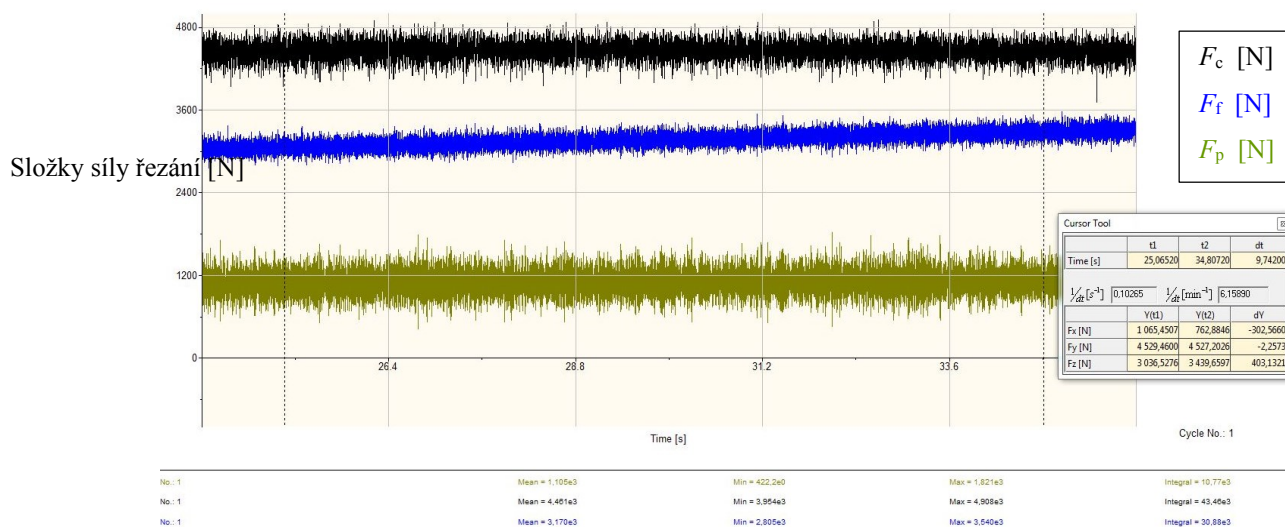
Na následujícím obrázku zobrazující vrůstající fázi řezu je vidět vzrůstající průběh řezné a posuvové složky, tak jak se dá teoreticky očekávat. Pasivní složka stagnuje kolem průměrné hodnoty $F_p = 1\,050 \text{ N}$.



Obr. 10.11 Průběh složek sil řezání v průběhu vzrůstající dílčí fáze řezu při proměnné a_p

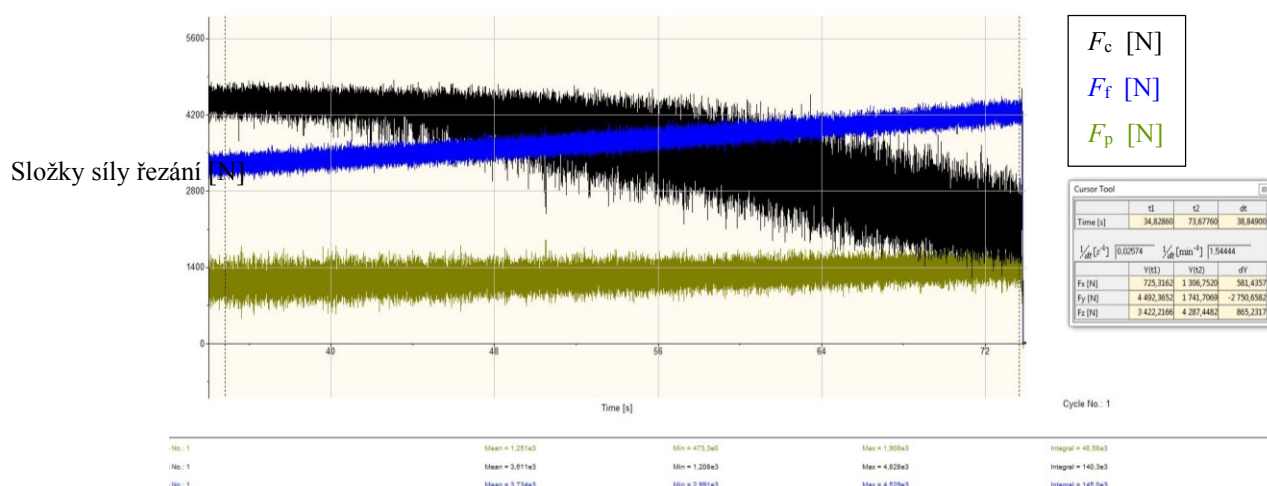
$$(a_p = 1,5 \text{ až } 2,5 \text{ mm}, f = 0,4 \text{ mm}, v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1})$$

V další dílčí fázi řezu (přechodové) dochází ke stagnaci řezné složky a pokračujícímu předpokládanému zvyšování posuvové složky síly řezání. Pasivní složka síly stále stagnuje okolo průměrné hodnoty $F_p = 1\,050\text{ N}$. Tento ustálený stav signalizuje velice příznivý proces obrábění.



Obr. 10.12 Průběh složek sil řezání v průběhu dílčí přechodové fáze řezu při proměnné a_p
 $(a_p = 1,5 \text{ až } 2,5 \text{ mm}, f = 0,4 \text{ mm}, v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1})$

Poslední dílčí fázi řezu (fáze klesající F_c) před fází výstupu nástroje z řezu je klesající průběh řezné složky při zvyšujícím se rozkmitu. Řezná složka poklesne z hodnoty $F_c = 4\,460\text{ N}$ a rozkmitu 954 N na hodnotu $F_c = 2\,140\text{ N}$ a rozkmitu $2\,000\text{ N}$. Tento klesající průběh je anomálií pozorovatelný u všech měření strategie proměnné a_p .



Obr. 10.13 Průběh složek sil řezání v průběhu dílčí klesající fáze řezu při proměnné a_p
 $(a_p = 1,5 \text{ až } 2,5 \text{ mm}, f = 0,4 \text{ mm}, v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1})$

Změna průběhu řezné složky může být interpretována dvěma způsoby:

1) Změna vlivem množství vygenerovaného tepla a teplotního gradientu. Dosažením určité teploty by v materiálu mělo dojít k tepelnému odpevňování, nárůstu a zrychlenému pohybu dislokací ve struktuře materiálu, náhlé změně metalurgických a mechanických vlastností vznikající třísky. Obráběný materiál a třísky již nekladou takový odpor vůči řeznému klínu nástroje a dochází k poklesu řezných sil [36]. Vznikem deformačního tepla se prohřívá obráběná plocha a v určitém čase řezu dojde k prohřátí materiálu na takovou míru, kdy dojde k poklesu řezného odporu za zvyšování rozkmitu řezné složky síly řezání.

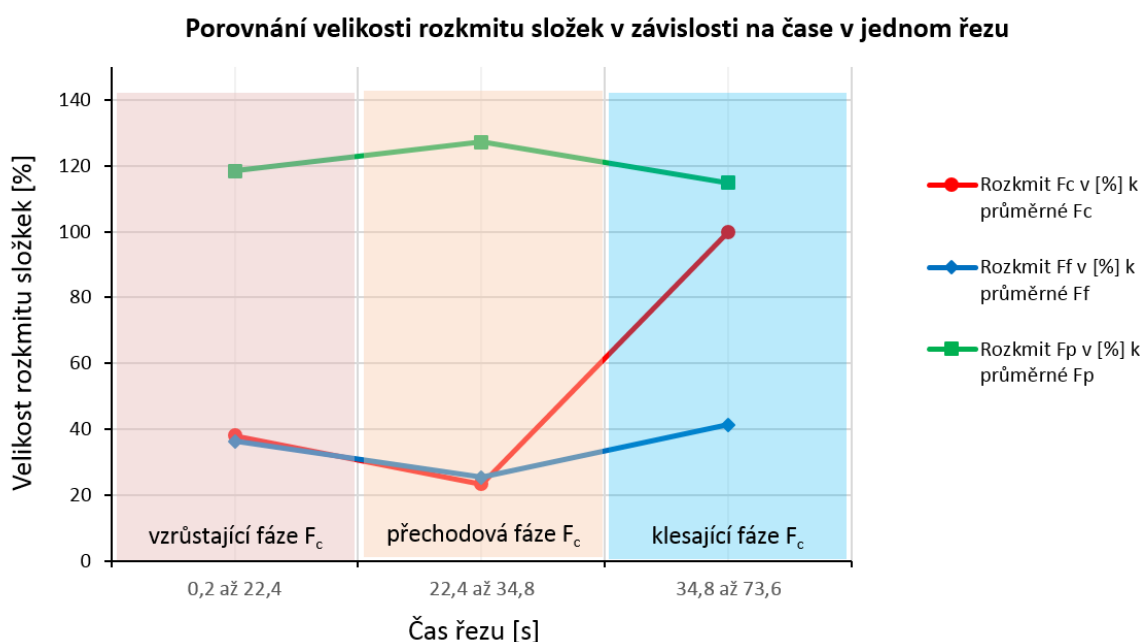
2) Změna vlivem řezných podmínek. Hloubka řezu vzroste na určitou hodnotu (v těchto případech vypočtenou na $a_p = 2 \text{ mm}$) při které dojde k poklesu řezného odporu.

Obě tyto úvahy vedou k širší odborné diskuzi, která překračuje zaměření práce, protože tyto zmiňované anomálie nesnižují trvanlivost nástroje. Zmiňované úvahy nastiňují další náměty pro disertační práce směřované obdobným směrem.

Až v této fázi, dle předpokladů, pasivní složka síly vzrůstá a to v průběhu 39 s vzroste na hodnotu $F_p = 1\,414 \text{ N}$, tedy vzroste o $\Delta F_p = 360 \text{ N}$. Průměrná hodnota v této části klesající fáze je $F_p = 1\,250 \text{ N}$.

Rozkmit řezné a posuvové složky koresponduje v rámci teorie obrábění, kdy je udáváno, že při obrábění se v závislosti na čase mění její okamžitá velikost jednotlivých složek sil (\pm až 20 %), a to i při obrábění za konstantních řezných podmínek. Je to způsobeno zejména rozptylem mechanických vlastností a nehomogenitou obráběného materiálu a procesem utváření třísky [41].

Následující obrázek ukazuje porovnání rozkmitu složek sil v procentních bodech vzhledem je jejich průměrné hodnotě a to v rozsahu jednoho řezu. Tento průběh lze vidět i u dalších řezů, kdy hloubka řezu u výstupu je na maximální hodnotě. Velký rozkmit řezné složky v klesající fázi F_c lze vysvětlit větší nehomogenitou v zahřátém materiálu. Graf ukazuje také velký rozkmit pasivní složky (vzhledem k její průměrné hodnotě) v celém průběhu řezu.

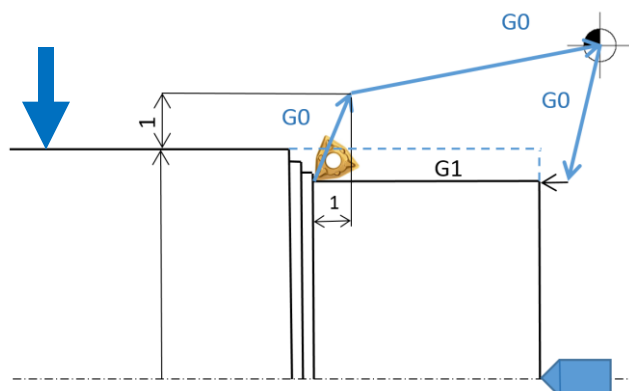


Obr. 10.14 Porovnání velikosti rozkmitu složek v závislosti na čase v jednom řezu (0,2 až 73,6 s), proměnná a_p ($a_p = 1,5$ až $2,5$ mm, $f = 0,4$ mm, $v_c = 230$ m·min⁻¹)

Obdobná odlišnost od strategie s konstantní hloubkou řezu lze pozorovat také u řezů s proměnnou a_p , kde řez začíná na maximální hodnotě a_p a končí na minimální a_p . Zde je však rozdíl v tom, že velikost rozkmitu řezné složky je menší než v počátku 2. fáze řezu (dílní fáze vzrůstající F_c), viz. Obr. 10.5. Z toho vyplývá, že hloubka řezu v daném rozmezí má

zásadní vliv na velikost rozkmitu řezné složky síly řezání.

Byla také zkoumána výstupní fáze jednotlivých řezů, kde byl záměrně zvolen při programování dráhy nástroje standardní výjezd nástroje z řezu, viz. následující obrázek.

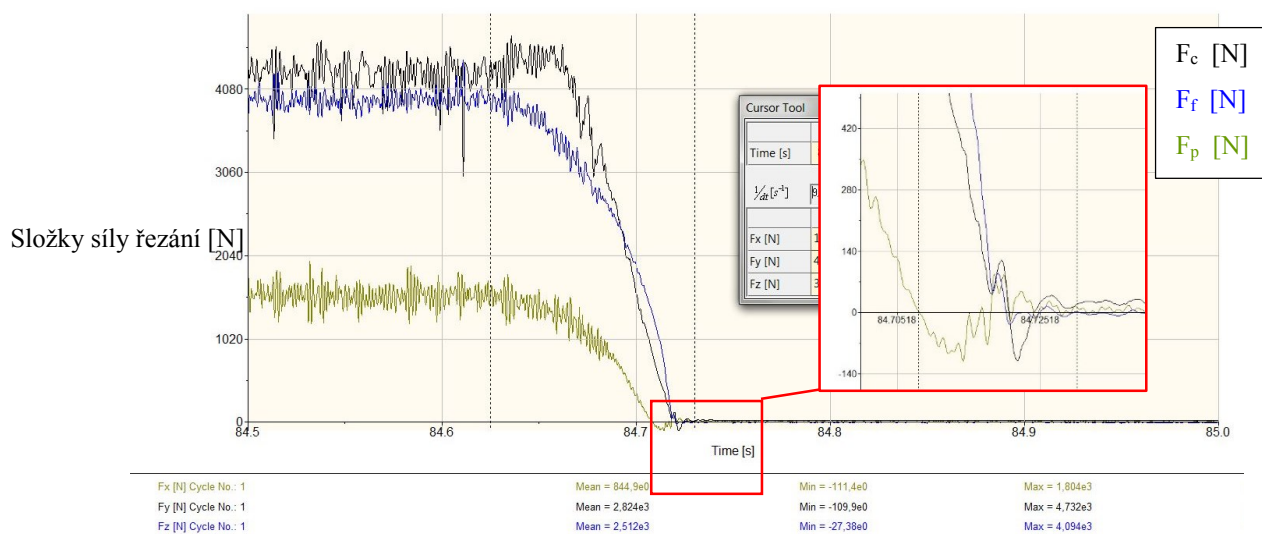


Obr. 10.15 Dráha nástroje při výjezdu z řezu

Následující obrázky ukazují detailnější znázornění jednotlivých složek sil v průběhu výstupní fáze (výjezdu z řezu). V této fázi dochází k redukci zatížení na řezném nástroji v opačném směru, než v jakém působí u vstupní fáze. Výstupní fázi je možno rozdělit do 5 dílčích fází [42] :

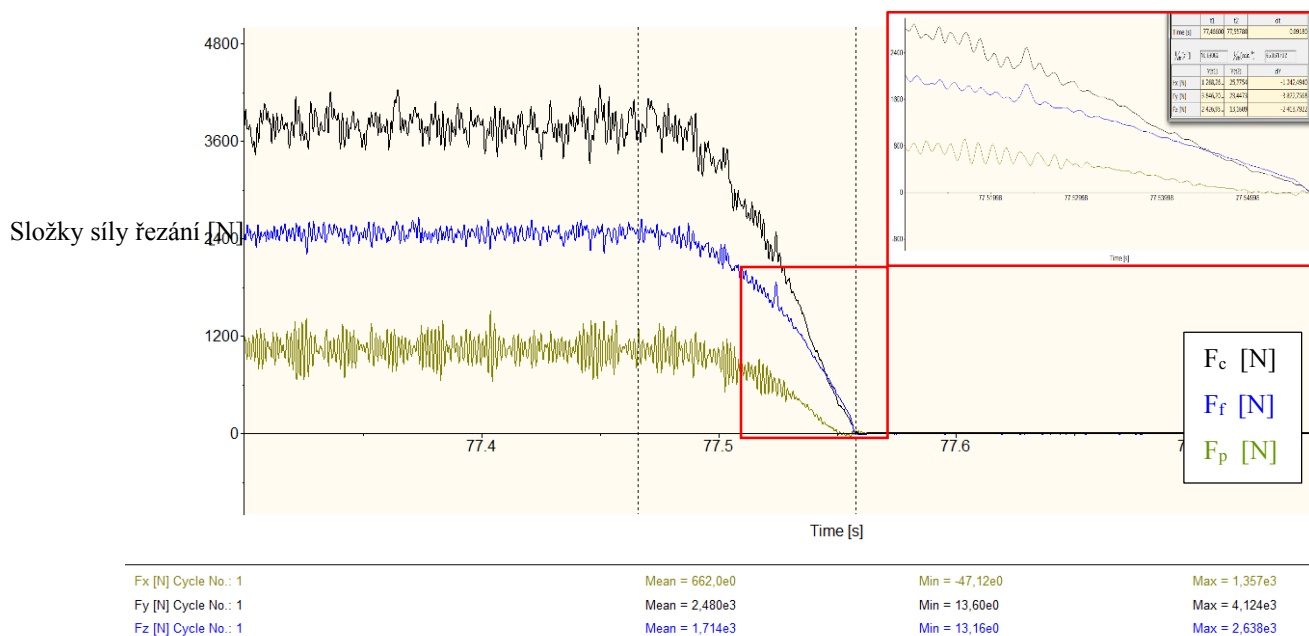
- plastická deformace vnějšího povrchu materiálu obrobku vede k redukci řezné složky a posuvové složky síly řezání,
- počátek rozvoje negativní smykové roviny,
- smykové napětí na čelní ploše mění směr,
- na čelní plochu nepůsobí zatížení,
- na hřbetní plochu nepůsobí zatížení.

Výstupní fáze u konstantní hloubky řezu vykazuje typický průběh při podélném soustružení. V detailním zobrazení, viz. Obr. 10.16 je vidět že v dílčí fázi 4 ustává kontakt třísek s čelní plochou, kontakt je primárně mezi obrobkem a hřbetní plochou nástroje. Během dílčí fáze 5 je hřbetní plocha také zbavena zatížení v axiálním a radiálním směru a obrobek elasticky odpruží zpět. To znázorňuje pokles pasivní složky F_p pod nulovou hodnotu.



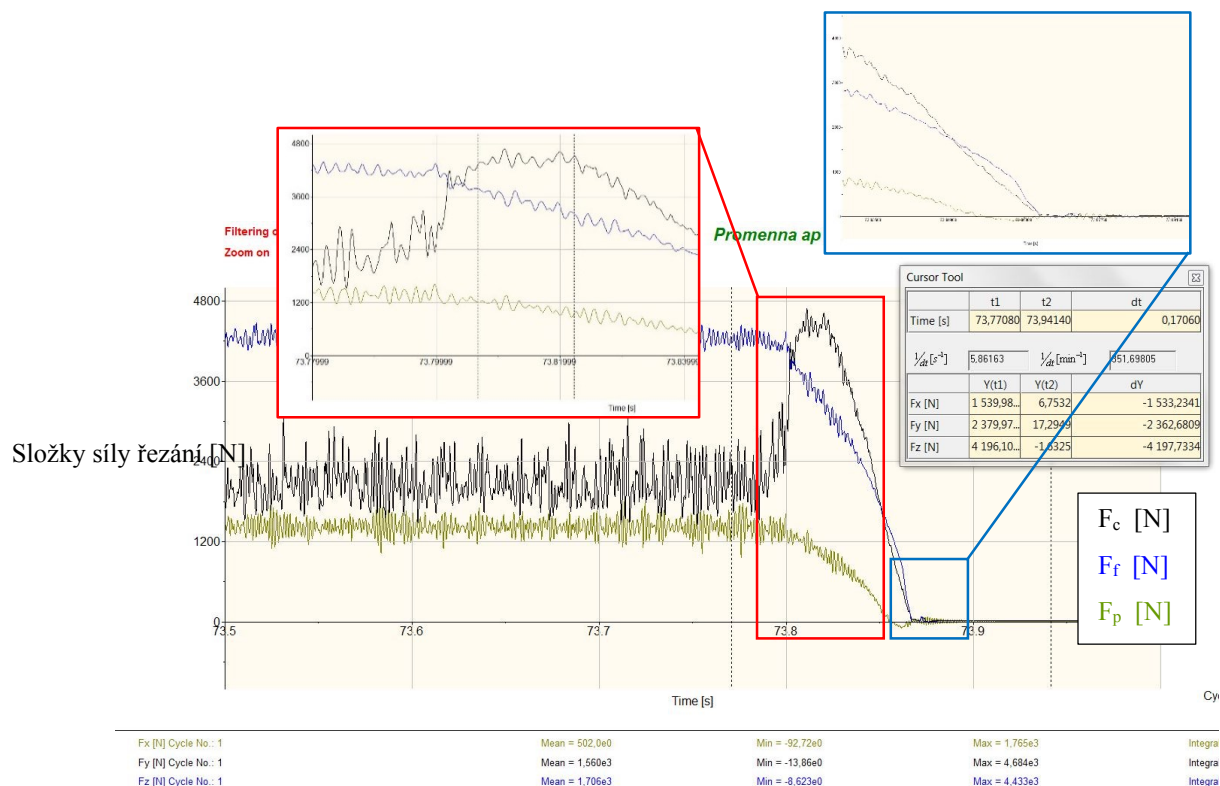
Obr. 10.16 Průběh složek sil řezání v průběhu výstupní fáze řezu při konstantní a_p
 ($a_p = 2 \text{ mm}$, $f = 0,4 \text{ mm}$, $v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$)

Výstupní fáze u proměnné hloubky řezu (viz. Obr. 10.17), kdy řez však končil minimální a_p vykazoval stejný průběh jako u konstantní a_p , tedy typický průběh pozorovatelný u podélného soustružení.



Obr. 10.17 Průběh složek sil řezání v průběhu výstupní fáze řezu při proměnné a_p
 ($a_p = 2,5 \text{ až } 1,5 \text{ mm}$, $f = 0,4 \text{ mm}$, $v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$)

Výstupní fáze u zkoumaného vzorku (a dalších) u proměnné hloubky řezu, kdy řez končil na maximální a_p však vykazuje anomálie, kdy řezná složka 0,07 sekundy před fází uvolnění prudce zvýší průměrnou hodnotu z $F_c = 1\,820\text{ N}$ na $F_c = 4\,429\text{ N}$ současně při razantním sníženém rozkmitu.



Obr. 10.18 Průběh složek sil řezání v průběhu výstupní fáze řezu při proměnné a_p
($a_p = 1,5$ až $2,5\text{ mm}$, $f = 0,4\text{ mm}$, $v_c = 230\text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$)

Tento průběh lze vysvětlit odpružením, změnou smyslu napětí v materiálu a šíření měrného řezného odporu v jednotlivých směrech, kdy se odpor neustále zvětšuje a najednou poklesne. Působí zde určitá setrvačnost systému. Naměřené data a jejich diskuze ukazují na nutnost dalšího následného širšího zkoumání této problematiky výjezdu nástroje z řezu.

Soubory hodnot proměnné a_p (ve fázi výjezdu z řezu), kdy řez je ukončen na minimální hodnotě hloubky řezu tuto anomálii nevykazují.

10.2 Analýza sil řezání v závislosti na opotřebení nástroje

Analýza výsledků naměřených hodnot je důležitá také z hlediska závislosti jednotlivých složek sil řezání na opotřebení rezného nástroje, tedy analýza v delším časovém intervalu, než v jednom řezu. Časovém intervalu rovnajícím se trvanlivosti bříty VBD.

Následující závislosti v grafech zobrazené plnou čarou ukazují průměrné hodnoty jednotlivých složek sil řezání vyhodnocené v časových intervalech (cca po 1 ½ minutě). Tečkovanou čarou jsou zaznačeny rozkmity (minimální a maximální hodnoty) jednotlivých složek sil v daný časový interval. Výslednice síly řezání je znázorněna fialovou plnou čarou. Výslednice je matematicky dopočtena pomocí softwaru MS Excel. Je dána vektorovým součtem jednotlivých složek sil řezání, viz. následující vzorec.

$$F_v = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad (4)$$

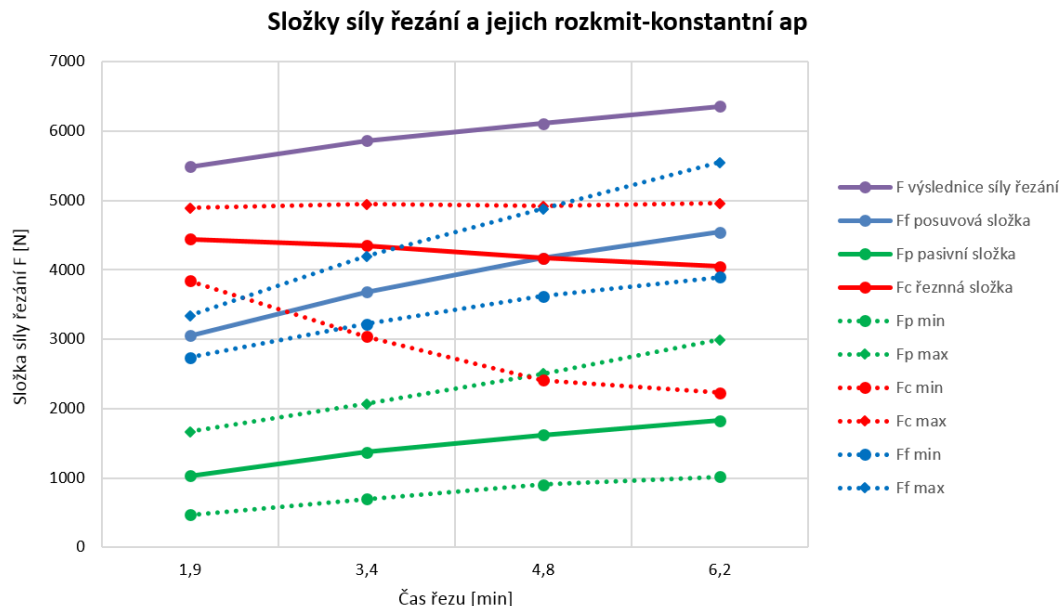
kde:

F_v vyjadřuje výslednici síly řezání,

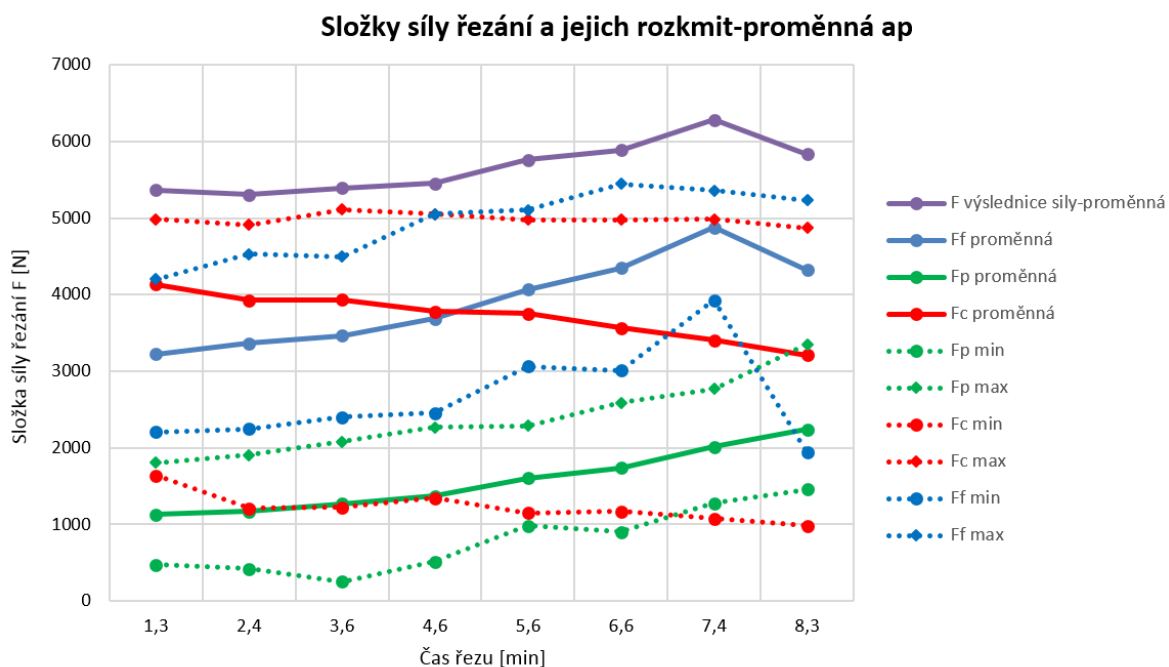
F_p vyjadřuje pasivní (radiální) složku síly řezání,

F_c vyjadřuje reznou složku síly řezání,

F_f vyjadřuje posuvovou složku síly řezání.



Obr. 10.19 Složky síly řezání a jejich rozkmit při soustružení strategií s konstantní a_p v závislosti na čase řezu ($a_p = 2 \text{ mm}$, $f = 0,4 \text{ mm}$, $v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$)



Obr. 10.20 Složky síly řezání a jejich rozkmit při soustružení strategií s proměnnou a_p v závislosti na čase řezu ($a_p = 1,5 \text{ až } 2 \text{ mm}$, $f = 0,4 \text{ mm}$, $v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$)

U obou strategií je vidět předpokládaný nárůst složek sil řezání F_f a F_p při zvětšujícím se opotřebení VBD, avšak klesající průběh řezné složky.

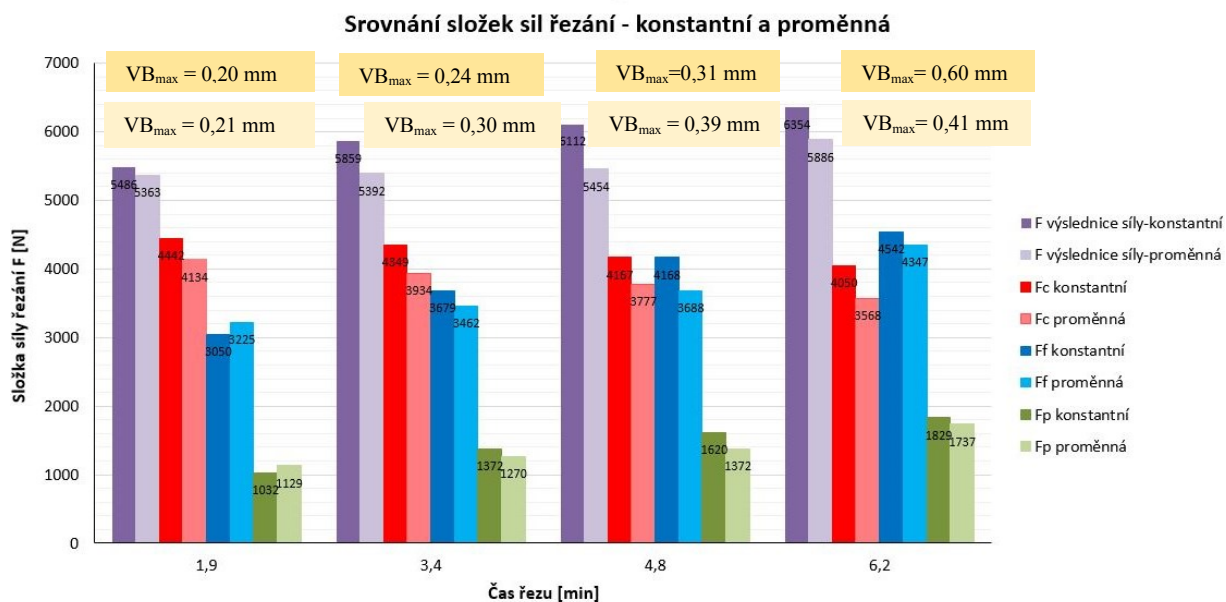
Je však nutné se detailněji zaměřit na velikosti rozptylu jednotlivých složek a na velikosti rozptylu jednotlivých složek vzhledem k jejich průměrné hodnotě.

Strategie s proměnnou a_p vykazuje nižší hodnoty výslednice sil řezání, vykazuje také nižší hodnoty všech složek sil řezání. Porovnání jednotlivých složek síly řezání a výslednice při soustružení s konstantní a_p a proměnnou a_p v závislosti na čase řezu, viz. *Obr. 10.21* ukazuje příznivý dopad navrhované strategie na silové působení a tedy i na energetickou náročnost procesu obrábění. V grafu je také zaznačeno opotřebení VB_{\max} odpovídající danému strojnímu času.

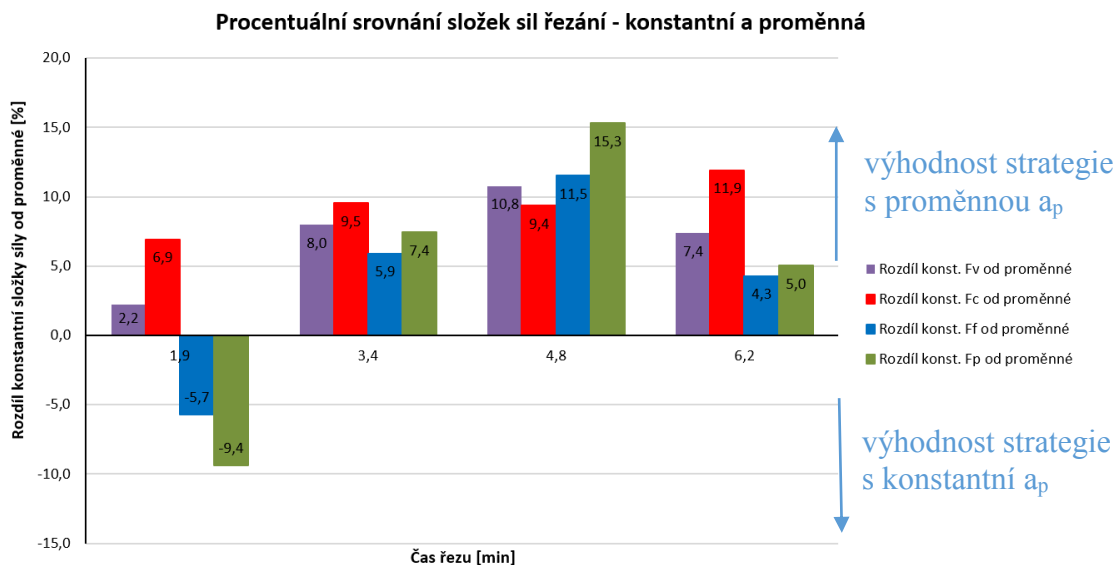
Procentuální porovnání ukazuje Tabulka 13. Procentuální porovnání obou strategií vychází ve prospěch nové strategie s proměnnou hloubkou řezu, viz. *Obr. 10.22*. Jen v prvních dvou minutách obrábění je silové působení strategie s konstantní a_p výhodnější.

Tabulka 13 Porovnání rozdílu velikosti jednotlivých složek sil řezání u strategie s konstantní a_p a proměnnou a_p

Rozdíl velikosti složek sil (proměnná a_p - konstantní a_p)							
Řezná složka F_c		Posuvová složka F_f		Pasivní složka F_p		Výslednice sil F_v	
[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]
308	6,9	-175	-5,7	-97	-9,4	123	2,2
415	9,5	217	5,9	102	7,4	467	8,0
390	9,4	480	11,5	248	15,3	658	10,8
482	11,9	195	4,3	92	5,0	468	7,4

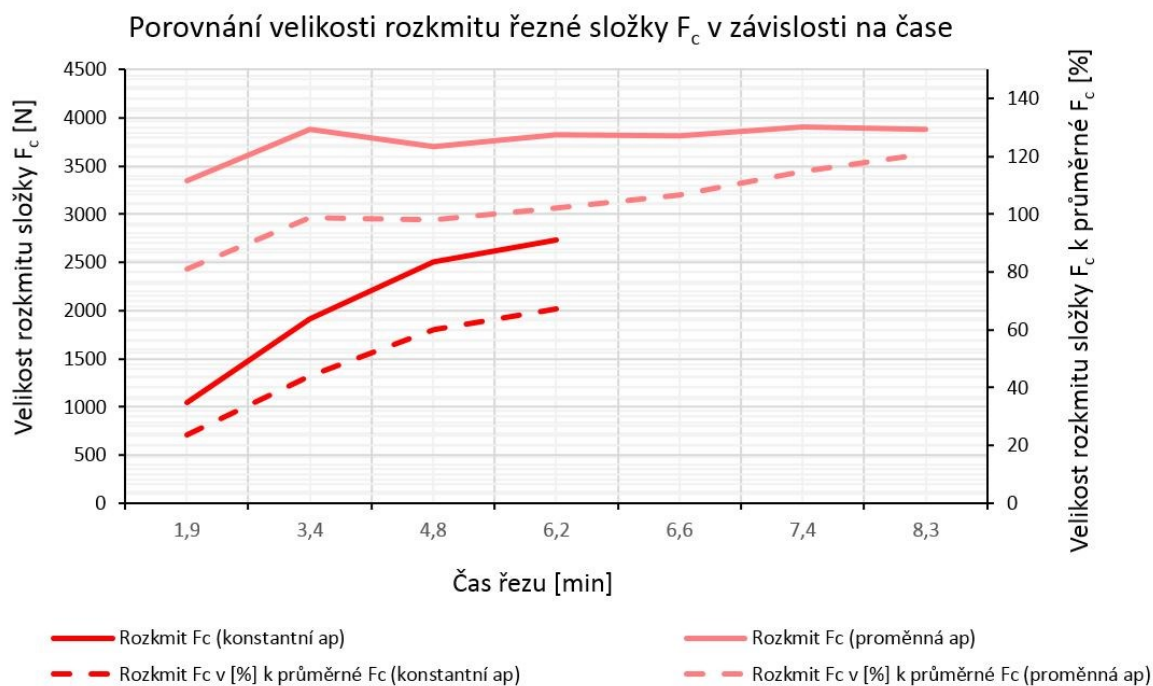


Obr. 10.21 Porovnání jednotlivých složek síly řezání a výslednice při soustružení s konstantní $a_p = 2$ mm a proměnnou $a_p = 1,5$ až $2,5$ mm v závislosti na čase řezu ($f = 0,4$ mm, $v_c = 230$ m·min⁻¹)



Obr. 10.22 Procentuální porovnání jednotlivých složek síly řezání a výslednice při soustružení strategií s konstantní $a_p = 2 \text{ mm}$ a proměnnou $a_p = 1,5 \text{ až } 2,5 \text{ mm}$ v závislosti na čase řezu ($f = 0,4 \text{ mm}$, $v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$)

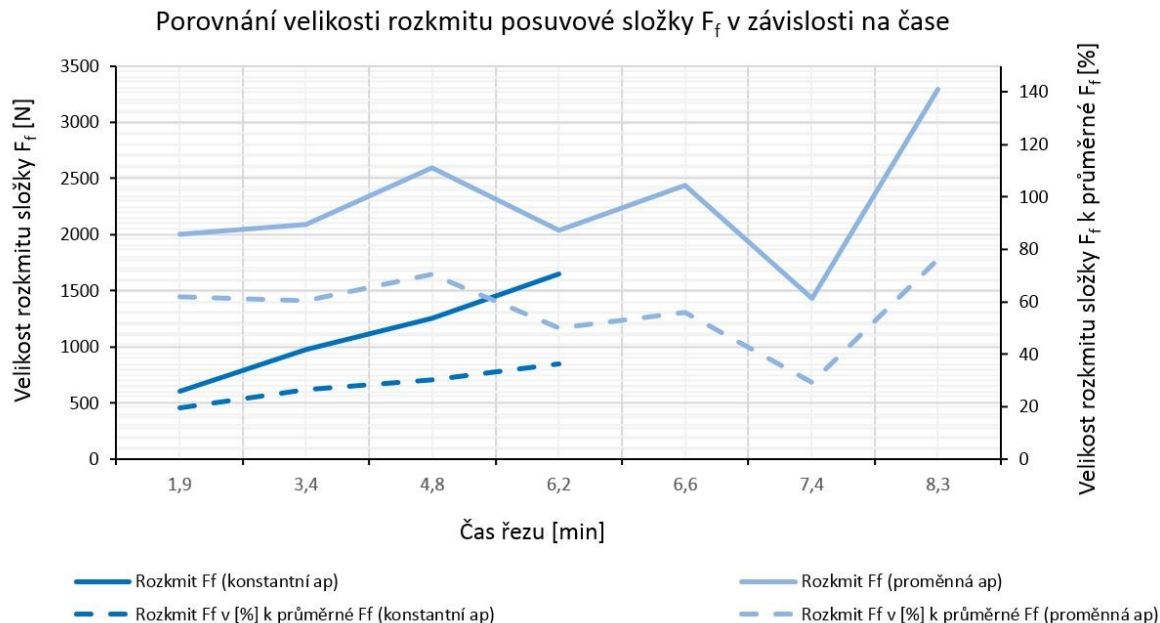
Následující obrázek ukazuje porovnání velikosti rozkmitu řezné složky síly řezání u strategie soustružení s konstantní a proměnnou hloubkou řezu a velikosti rozptylu v procentních bodech vzhledem k průměrné hodnotě řezné složky F_c . Obě strategie vykazují rovnoměrné zvětšování velikosti rozptylu vzhledem k průměrné složce F_c se zvětšujícím se opotřebením, což potvrzuje teorii, avšak u konstantní a_p je průběh stoupání strmější. Velikost rozkmitu ukazuje nevýhodnost strategie soustružení s proměnnou a_p , avšak nedosahuje stejné trvanlivosti jako strategie proměnná a_p .



Obr. 10.23 Porovnání velikosti rozkmitu řezné složky síly řezání při soustružení s konstantní $a_p = 2 \text{ mm}$ a s proměnnou $a_p = 1,5$ až $2,5 \text{ mm}$ v závislosti na čase řezu ($f = 0,4 \text{ mm}$, $v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$)

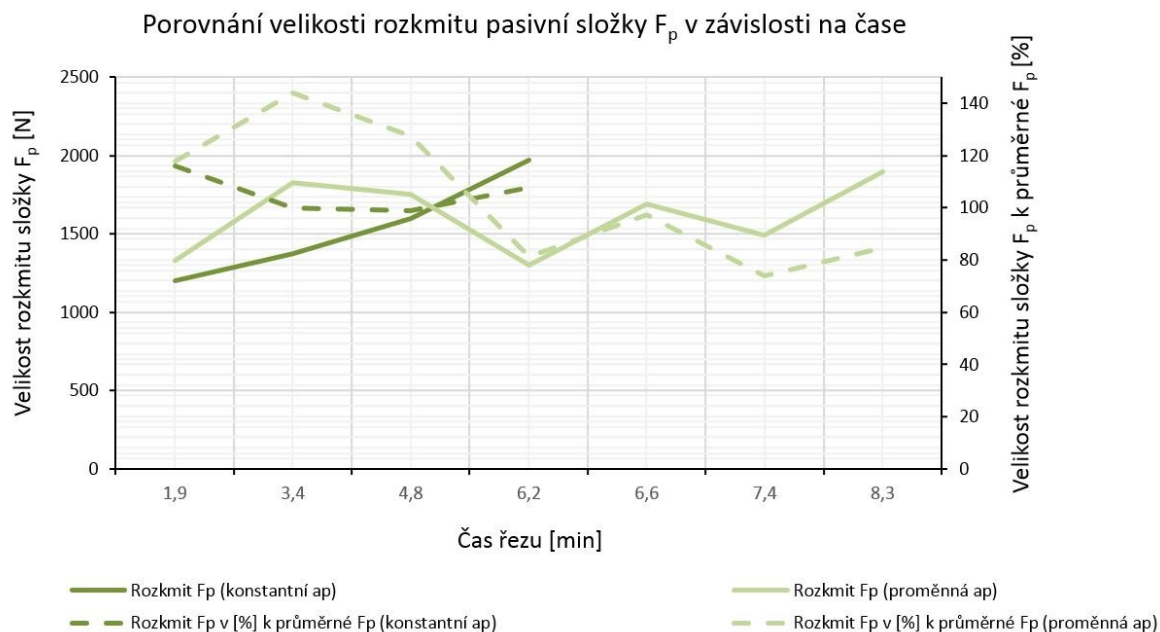
Následující obrázek (Obr. 10.24) ukazuje porovnání velikosti rozkmitu posuvové složky síly řezání strategie soustružení s konstantní a proměnnou hloubkou řezu a velikosti rozptylu v procentních bodech vzhledem k průměrné hodnotě posuvové složky F_f . V oblasti rovnoměrného nárůstu opotřebení (II. oblast) dochází ke snižování velikosti rozptylu i velikosti rozptylu vzhledem k průměrné složce F_f se zvětšujícím opotřebením u proměnné a_p . Ve III. oblasti opotřebení pak dochází ke zvyšování rozptylu vlivem delšího kontaktu opotřebeného nástroje s třískou.

Toto porovnání ukazuje výhodnost strategie soustružení s konstantní a_p , která vykazuje nižší rozptyl a nižší velikost rozptylu vzhledem k průměrné složce F_f , avšak nedosahuje stejné trvanlivosti jako strategie proměnné a_p . (trvanlivost VBD u proměnné a_p byla za hranicí 8 min.)



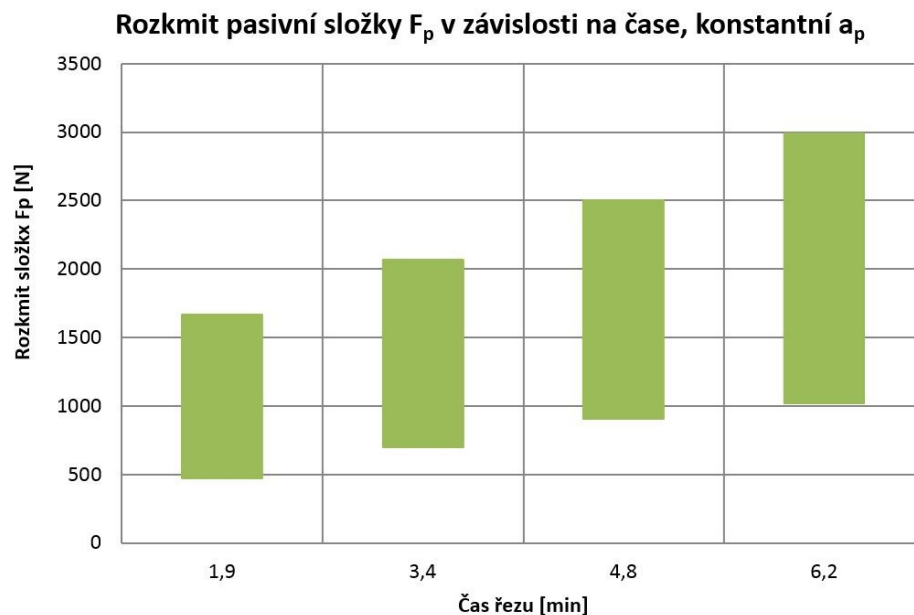
Obr. 10.24 Porovnání velikosti rozkmitu posuvové složky síly řezání při soustružení s konstantní $a_p = 2 \text{ mm}$ a s proměnnou $a_p = 1,5 \text{ až } 2,5 \text{ mm}$ v závislosti na čase řezu ($f = 0,4 \text{ mm}$, $v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$)

Následující obrázek ukazuje porovnání velikosti rozkmitu pasivní složky síly řezání při soustružení s konstantní a proměnnou hloubkou řezu a velikosti rozptylu v procentních bodech vzhledem k průměrné hodnotě řezné složky F_p . Ze všech tří složek vykazuje pasivní složka nejvyšší hodnoty rozptylu vzhledem k její průměrné hodnotě (u obou strategií). Pasivní složka výrazným způsobem ovlivňuje rozměrovou přesnost obráběných ploch, odchylky geometrického tvaru, polohy a drsnost obrobeného povrchu. Proto je snahou rozkmit této složky eliminovat. Cesta k eliminaci rozptylu pasivní složky může být právě v navrhované strategii, kdy dochází ke snižování velikosti rozptylu i velikosti rozptylu vzhledem k průměrné složce F_p se zvětšujícím opotřebením u strategie proměnné hloubky řezu. Toto porovnání ukazuje výhodnost strategie soustružení s proměnnou a_p ve fázi oblasti rovnoměrného nárůstu opotřebením (oblast opotřebením II). U strategie proměnné a_p se pasivní složka mírně zvětšuje s rostoucím opotřebením VB , ale rozptyl se vzhledem k její velikosti naopak zmenšuje, což příznivě působí na stabilitu procesu řezání. Tento příznivý útlum rozkmitu u pasivní složky se více projevuje u strategie proměnné a_p .

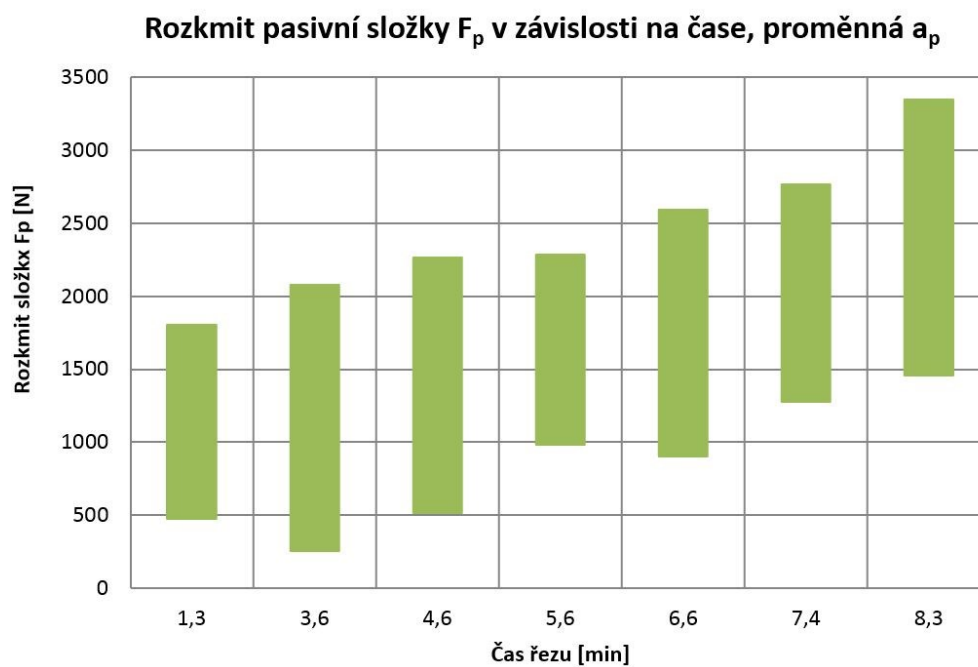


Obr. 10.25 Porovnání velikosti rozkmitu pasivní složky síly řezání u strategie soustružení s konstantní $a_p = 2 \text{ mm}$ a s proměnnou $a_p = 1,5 \text{ až } 2,5 \text{ mm}$ v závislosti na čase řezu ($f = 0,4 \text{ mm}$, $v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$)

Na následujícím grafu jsou uvedeny velikosti rozkmitu pasivní složky síly řezání na čase. Znázorňují minimální a maximální hodnotu složky F_p v daných časových intervalech. Při zvětšování opotřebení VBD dochází u obou strategií ke zvětšování rozptylu společně se zvětšováním minimální hodnoty F_p a maximální hodnoty F_p .



Obr. 10.26 Velikosti rozkmitu pasivní složky síly řezání při soustružení s konstantní $a_p = 2 \text{ mm}$ a v závislosti na čase řezu ($f = 0,4 \text{ mm}$, $v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$)



Obr. 10.27 Rozkmit pasivní složky síly řezání při soustružení s proměnnou $a_p = 1,5$ až $2,5 \text{ mm}$ v závislosti na čase řezu ($f = 0,4 \text{ mm}$, $v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$)

Příloha 4 ukazuje netradiční zobrazení části výsledků měření jednotlivých složek sil řezání s využitím softwaru Matlab. Snahou je přehledné zobrazení vektoru výslednice síly řezání, tedy zobrazení velikosti i směru působení výslednice. Toto názorné zobrazení je adekvátní ke standardní prezentaci poměru složek sil řezání v tabulkové podobě, viz. tab. 14.

Uváděné tabulky jsou pro tytéž řezné podmínky (konstantní $a_p = 2$ mm, proměnná $a_p = 1,5$ až $2,5$ mm, $f = 0,4$ mm, $v_c = 230$ m·min⁻¹). Z přílohy č. 4 lze vyčíst velikost a změnu orientace výslednice síly řezání F_v .

Z tabulky 14 je patrný strojní čas, kdy dojde ke změně poměru jednotlivých složek sil řezání. Při prvních 4 minutách řezu je poměr složek dle očekávání. Změna poměru nastává u konstantní a_p dříve, než u proměnné a_p . Po čase 4,8 min dojde ke změně poměru, z dominantní řezné složky na dominantní posuvovou složku. To lze vysvětlit opotřebením břitů, které se dostalo do oblasti III. (oblast zvýšeného nárůstu opotřebení).

Posuvová složka se využívá se na dimenzování posuvových mechanismů. Poměr velikosti jednotlivých složek síly řezání je dán především zvolenou technologií obrábění, řeznými podmínkami, řezným prostředím, geometrií a materiálem řezného nástroje. V odborné literatuře je často udáván poměr složek $F_c : F_f : F_p = 1 : 0,4 : 0,25$ (platí pro $\kappa_r = 45^\circ$), který může být interpretován s prezentovaným výzkumem v prvních 4 minutách řezu, kdy opotřebení nedosáhlo hranice $VB = 0,3$ mm.

Tabulka 14 Srovnání poměru složek sil řezání při soustružení strategií s konstantní a proměnnou hloubkou řezu

Tabulka poměru složek sil řezání v závislosti na čase obrábění						
čas	konstantní hloubka řezu			proměnná hloubka řezu		
	F_c (řezná složka)	F_f (posuvová složka)	F_p (pasivní složka)	F_c (řezná složka)	F_f (posuvová složka)	F_p (pasivní složka)
[min]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1,9	1	0,69	0,38	1	0,53	0,27
3,4	1	0,85	0,48	1	0,61	0,32
4,8	0,99	1	0,60	1	0,65	0,36
6,2	0,89	1	0,66	0,92	1	0,39
6,6	-	-	-	0,82	1	0,40
7,4	-	-	-	0,70	1	0,41
8,3	-	-	-	0,74	1	0,52

Strojní čas (nebo také časový úsek), při kterém dojde ke změně poměru jednotlivých složek sil řezání, signalizuje zvyšující se nárůst opotřebení břitů. Opotřebení se dostává do III. oblasti zvýšeného nárůstu opotřebení signalizující ukončení trvanlivosti nástroje. Tento poznatek lze využít pro on-line sledování trvanlivosti břitů nástroje pomocí záznamu a okamžitému vyhodnocení sil řezání.

10.3 Závěrečná analýza sil řezání

Následně jsou uvedeny závěry s ohledem na silové působení při porovnání strategie s konstantní a s proměnnou hloubkou řezu při jednom řezu, tedy v průběhu jednoho záběru mírně opotřebeného nástroje (při opotřebení v oblasti rovnoměrného nárůstu opotřebení (II. oblast opotřebení):

- Rozbor vstupní fáze řezu nevykazuje podstatné rozdíly u sledovaných strategií. (Celkový vstupní čas je však u strategie s konstantní a_p vyšší o 0,05 s)
- Fáze řezu stagnace je u strategie proměnné a_p velice odlišná. Lze ji rozdělit do 3 dílčích fází:
 - 1) dílčí fáze vzrůstající F_c ,
 - 2) dílčí fáze přechodová F_c ,
 - 3) dílčí fáze klesající F_c .
- Klesající průběh F_c je anomálií pozorovatelný u všech měření strategie proměnné a_p .
- Rozbor fáze řezu stagnace u strategie proměnné a_p vykazuje klesající průběh řezné složky F_c více než 50% strojního času ke konci řezu při velkém rozkmitu to lze vysvětlit větší nehomogenitou v zahřátém materiálu.
- Strategie s proměnnou a_p , kde řez začíná na maximální hodnotě a_p a končí na minimální a_p vykazuje nižší rozkmit řezné složky než v počátku druhé fáze řezu (dílčí fáze vzrůstající F_c). Z toho vyplývá, že hloubka řezu v daném rozmezí má vliv na velikost rozkmitu řezné složky síly řezání.
- Rozkmit řezné a posuvové složky koresponduje v rámci teorie obrábění, kdy je udáváno, že při obrábění se v závislosti na čase mění její okamžitá velikost jednotlivých složek sil (\pm až 20 %) i při obrábění za konstantních řezných podmínek.

- V průběhu řezu u strategie proměnné a_p pasivní složky síly navzdory zvětšující se hloubce řezu stagnují okolo průměrné hodnoty. Tento ustálený stav je velice příznivý k procesu obrábění. K mírnému zvětšení ($\Delta F_p = 360 \text{ N}$) dochází až v druhé polovině řezu.
- Obě porovnávané strategie vykazují velký rozkmit pasivní složky (vzhledem k její průměrné hodnotě) v celém průběhu řezu. (strategie proměnná a_p až 120 %)
- Pasivní složka síly řezání F_p má u strategie proměnné a_p nižší rozkmit.
- Potvrzení teorie obrábění kdy pasivní složka síly vykazuje nejnižší hodnoty.
- Výstupní fáze řezu u strategie proměnné a_p (viz. *Obr.10.17*), kdy řez končil minimální a_p vykazuje stejný průběh jako u strategie konstantní a_p , tedy typický průběh pozorovatelný u podélného soustružení.
- Výstupní fáze u strategie proměnné hloubky řezu, kdy řez končil na maximální a_p však vykazuje anomálie, kdy řezná složka 0,07 sekundy před fází uvolnění prudce zvýší průměrnou hodnotu z $F_c = 1\,820 \text{ N}$ na $F_c = 4\,429 \text{ N}$ současně při razantním sníženém rozkmitu, viz. *Obr. 10.18*.

Byly učiněny také závěry s ohledem na silové poměry při porovnání strategie s konstantní a s proměnnou hloubkou řezu v celém časovém intervalu trvanlivosti VBD:

- U obou porovnávaných strategií je vidět předpokládaný nárůst složek sil řezání F_f a F_p při zvětšujícím se opotřebení VBD, avšak klesající průběh řezné složky.
- Porovnání jednotlivých složek síly řezání a výslednice při soustružení s konstantní a_p a proměnnou a_p v závislosti na čase řezu, viz. *Obr. 10.21* a *tabulka 13*. ukazuje příznivý dopad navrhované strategie na silové působení a tedy i na energetickou náročnost procesu obrábění.
 - Strategie s proměnnou a_p vykazuje nižší hodnoty výslednice sil řezání v průběhu trvanlivosti nástroje až o $\Delta F_v = 658 \text{ N}$, tj. $\Delta F_v = 10,8\%$.
 - Strategie s proměnnou a_p vykazuje nižší hodnoty řezné složky síly řezání v průběhu trvanlivosti nástroje $\Delta F_c = 482 \text{ N}$, tj. $\Delta F_c = 11,9\%$.
 - Strategie s proměnnou a_p vykazuje nižší hodnoty posuvové složky síly řezání v průběhu trvanlivosti nástroje $\Delta F_f = 480 \text{ N}$, tj. $\Delta F_f = 11,5\%$.

- Strategie s proměnnou a_p vykazuje nižší hodnoty pasivní složky síly řezání v průběhu trvanlivosti nástroje $\Delta F_p = 248 \text{ N}$, tj. $\Delta F_p = 15,3\%$.
- Při strojním čase 4 minut došlo ke změně poměru jednotlivých složek sil řezání. Při prvních 4 minutách řezu je poměr složek jednotlivých sil dle očekávání. Změna poměru nastává u konstantní a_p dříve, než u proměnné a_p . Po čase 4,8 min dojde ke změně poměru, z dominantní řezné složky na dominantní posuvovou složku. Posuvová složka se využívá se na dimenzování posuvových mechanismů. Poměr velikosti jednotlivých složek síly řezání je dán především zvolenou technologií obrábění, řeznými podmínkami, řezným prostředím, geometrií a materiálem řezného nástroje.

11. ZÁVĚRY

Disertační práce shrnuje úvod do problematiky zvyšování trvanlivosti řezného za použití nově navrhovaných hrubovacích strategií s proměnnou hloubkou řezu.

Zvýšení trvanlivosti řezného břitů lze vysvětlit za pomoci teoretických poznatků o opotřebení nástroje. Pro jejich potvrzení však bylo nutné vykonat řadu experimentů.

Disertační práce přinesla nové poznatky do oblasti teoretických rozborů soustružení s proměnnou hloubkou řezu.

Práce ukazuje a potvrzuje velký význam zkoumání této problematiky jak z pohledu teoretických výzkumů, které jsou základem pro praktické uplatnění, tak z pohledu okamžitého praktického ověření v praxi. Byly dokázány silné závislosti aplikace navržené technologie na výsledcích procesu obrábění.

Kapitola 4 - Návrh efektivních hrubovacích cyklů navrhuje varianty hrubovacích cyklů. Předkládá varianty začlenění výsledků výzkumu do pracovního postupu programování CNC obráběcího stroje. Kapitola tak přispívá k praktickému uplatnění výsledků výzkumu. Ve vědeckovýzkumné oblasti ukazuje směr vývoje CAM systémů. Navrhuje možné varianty implementace výzkumu do 2osých soustružnických modulů CAM systémů. Popisuje tyto hrubovací cykly:

- Hrubovací cyklus „úbytek záběru“.
- Hrubování s vytvářením kuželové plochy.
- Hrubování nepřímkovými metodami.

Současné CAD/CAM systémy nabízí řadu automatických funkcí, speciálních nabídek a vylepšení, které přispívají ke zvyšování efektivnosti v obrábění. Největší pokrok je zaznamenán v oblasti, která je z hlediska současného požadavku uživatelů nejvíce preferovaná a tou je efektivní strategie obrábění.

Kapitola 9 – Opotřebení řezného nástroje při soustružení strategií s konstantní a strategií proměnnou hloubkou řezu uvádí aspekty využitelnosti navrhovaných strategií z hlediska zvyšování trvanlivosti. Jedná se především o posun opotřebení (vrubu VB) na jinou část ostří, což přináší zvýšení trvanlivosti nástroje. Kapitola porovnává a hodnotí řezný nástroj z hlediska opotřebení a životnosti. Výsledky lze shrnout do těchto bodů:

- Nově navržená strategie s proměnnou hloubkou řezu vykazuje menší hodnoty opotřebení VB a KB při odebrání stejného objemu materiálu než u strategie s konstantní hloubkou řezu.
- Životnost řezného materiálu se aplikací proměnné hloubky řezu zvýšila z $T = 6$ min. na $T = 8$ min.
- U nově navržené strategie s proměnnou hloubkou řezu je opotřebení rozloženo na delší části břitu (neprojevovalo se ve formě výrazné rýhy na hřbetu).
- U standartní strategie s konstantní hloubkou řezu se projevuje vrypové opotřebení ve formě hlubokého žlábků (vliv oxidačních projevů).

Kapitola 10 – Síly řezání při podélném soustružení s konstantní a proměnnou hloubkou řezu rozšiřuje poznatky pro možnou praktickou realizaci navrhované strategie s proměnnou hloubkou řezu za účelem zefektivnění výroby. Strategie s proměnnou hloubkou řezu má příznivý vliv na velikost výslednice síly řezání a jednotlivých složek síly řezání a jejich rozkmit. Zaznamenané výrazné snížení velikosti sil řezání má příznivý vliv na stabilitu a energetickou náročnost řezného procesu.

Procentuální vyjádření poklesu jednotlivých složek a výslednice síly řezání koresponduje s procentuálním vyjádřením zvýšením trvanlivosti řezného nástroje.

Práce také ukazuje možnost vyhodnocení jednotlivých složek sil řezání netradičním způsobem. S využitím softwaru Matlab je zobrazen vektor výslednice síly řezání se směrem působení v průběhu jednoho řezu, nebo v delším časovém intervalu odpovídajícím trvanlivosti nástroje (Příloha 4).

Strojní čas (nebo také časový úsek), při kterém dojde ke změně poměru jednotlivých složek sil řezání, signalizuje zvyšující se nárůst opotřebení břitu. Opotřebení se dostává do III. oblasti zvýšeného nárůstu opotřebení signalizující ukončení trvanlivosti nástroje. Tento poznatek lze využít pro on-line sledování trvanlivosti břitu nástroje pomocí záznamu a okamžitému vyhodnocení sil řezání.

Shrnutím poznatků problematiky soustružnických hrubovacích cyklů lze učinit souhrnný závěr, který udává tyto hlavní výhody použití proměnné hloubky řezu:

- Zvýšení trvanlivosti nástroje o $\Delta T = 2$ min (asi o 20%).
- Snížení energetického zatížení obráběcího stroje.
- Snížení výslednice sil řezání v průběhu trvanlivosti nástroje až o $\Delta F_v = 658$ N, $\Delta F_v = 10,8\%$.
- Změna poměru složek sil řezání signalizující ukončení trvanlivosti nástroje.

11.1 Přínos pro využití v praxi

Praktická aplikace práce je zaměřena na použití soustružnických nožů s vyměnitelnými břitovými destičkami ze slinutého karbidu u nově navrženého cyklu soustružení – strategie s vytvářením kuželové plochy.

Uvedené výsledky a závěry dílčích kapitol pomohou zejména technologům vytvářející NC programy pro soustružení hřídelových a přírubových typů součástí, kde je potřeba aplikovat hrubovací cyklus podélného nebo čelního soudružení. Pro požadavek zvyšování trvanlivosti nástroje, zmenšení energetické náročnosti obrábění, anebo ovlivnění jednotlivých složek sil řezání (zejména pasivní složky, která velkou měrou ovlivňuje průhyb tenkostěnných součástí, tím přesnost a také drsnost povrchu) může technolog efektivně navrhnout strategii obrábění a řezné podmínky. Jedná se o exaktní stanovení hloubky řezu a určení způsobu naprogramování dráhy nástroje. Volba požadovaných parametrů se nebude řídit jen zkušenostmi a odhadem, ale naopak výsledky experimentálních výzkumů.

Navržená technologie hrubovacího cyklu s proměnnou hloubkou řezu byla již aplikována ve firmě John Crane a.s., kde přinesla výsledky v podobě zvýšení trvanlivosti řezného břitu o 31% při zachování strojního času. Zvýšení trvanlivosti břitu nástroje snižuje výrazně celkové náklady na řezné nástroje. Tyto náklady jsou také sníženy méně častými prostoji při výměně opotřebeného nástroje. Bylo vyzorováno, že řezné nástroje ve firmě John Crane jsou vyřazovány z procesu obrábění příliš brzy (tzn. že by VBD mohla ještě obrábět). To se ale u nově navržené hrubovací strategie nestalo, protože opotřebení VB není pouhým okem viditelné a operátor se domnívá, že opotřebení není takové, aby bylo nutné otočit, nebo vyměnit VBD. Jelikož vryp je rozložen do delší části břitu, vypadá VBD pouhým okem jako neopotřebená. Jde tu tedy o jakýsi psychologický efekt, jak lze nepřímou oklamat

lidské smysly.

Dále se aplikací nové technologie projevilo i menším zatížením vřetene, které se snížilo vlivem použití nového hrubovacího cyklu (cyklus s vytváření kuželové plochy) o 10 %. Tento aspekt současně přinesl snížení energetické náročnosti obráběcího stroje, což patří mezi hlavní cíle disertační práce.

Práce také dokazuje, že efektivní strategie soustružení mají příznivý vliv na velikost a směr výslednice sil řezání a velikost a rozkmit jednotlivých složek řezání.

Práce také nastiňuje problematiku programování navrhovaných cyklů. To lze dvěma způsoby:

- 1) Pomocí dialogového programování u panelu obráběcího stroje.
- 2) Pomocí off-line programování v CAD/CAM systému.

Při použití strategie soustružení s proměnnou hloubkou řezu rostou nároky na kvalifikaci technologa – programátora CAM systému. Při použití CAD/CAM systému, je nutné dráhy nástroje mnohdy i jednotlivě zadávat, pokud nejsou v příslušném CAD/CAM systému již zakomponovány. Disertační práce našla řešení pro implementaci navržených technologií do soustružnických cyklů do prostředí modulu CAM.

11.2 Vědecký a společenský význam pro obor

Technologický vývoj se zaměřením na inovaci strategií soustružení, je inovativní jen tehdy, pokud má pozitivní vliv na ekonomické náklady a současně se zlepšuje ochrana životního prostředí, nebo alespoň nezhoršuje.

Hospodářskou využitelností je nalezení řešení ke zvyšování trvanlivosti nástroje, zkracování výrobních časů, zkvalitnění výroby a úspor nákladů v oblasti operace soustružení.

Rozšíření nových technologií do široké praxe je otázkou ekonomické rentability, kde prioritní roli hrají náklady na její zavedení, provoz a úspory, kterých lze jejich aplikací dosáhnout. Publikovaná technologie je specifická tím, že pro její plné využití je zapotřebí dokonalého technického vybavení (CAD/CAM systém - řídicí systém - obráběcí stroj) a technologickou vyspělost technologa-programátora CNC obráběcího stroje.

11.3 Cíle pro navazující výzkumy

Práce shrnuje poznatky dané problematiky publikované u nás i ve světě a rozšiřuje je o vlastní výzkumy. Výsledky disertační práce mohou přispět k rozvoji studijního oboru a jsou odrazovým můstkem pro další prováděné výzkumy v této oblasti. Je tedy vhodné se také zmínit o možných navazujících výzkumech na tuto práci:

- Analýza naměřených složek sil řezání pomocí numerických metod mechaniky (metodou konečných prvků) pro zkoumání tuhosti technologické soustavy. Tyto výzkumy by přispěly docílení maximální výsledné přesnosti obrábění a dimenzování soustavy stroj-nástroj-obrobek
- Výzkum nájezdu nástroje do řezu a výjezdu z hlediska analýzy sil řezání.
- Výzkum změny poměru jednotlivých složek sil.
- Výzkum závislosti povlaku VBD, pro zmírnění oxidačního opotřebení.

12. SUMMARY

Ph.D. thesis presents introduction to the topic increasing the durability of cutting tool using a newly proposed roughing strategies with variable depth of cut.

Ph.D. thesis is showing new insights in theoretical analyzes of turning with variable depth of cut.

Chapter 4 (Proposal of effective roughing cycles) suggests options of roughing cycles. The chapter describes roughing cycles:

- Roughing cycle "decreased cut".
- Roughing with the creation of the conical surface.
- Roughing with nonlinear methods.

Chapter 9 - Tool wear of the cutting tool during turning with constant and variable depth of cut presents aspects of applicability of the proposed strategies in terms of improving tool life. This is because the notch wear (VB notch) will move to another part of the cutting edge, which brings an increase in tool life.

The results can be summarized as follows:

- The newly proposed strategy with variable depth of cut shows less wear value VB_{max} and KB while is removing the same amount of material than with using the strategy with constant cutting depth.
- The life of the cutting tool with the application of variable depth of cut is increased from $T = 6$ min. to $T = 8$ min. (20 %)
- For newly proposed strategy with variable depth of cut is tool wear spread over into a longer part of the cutting tool.

Chapter 10 - Cutting forces while turning with constant and variable depth of cut increases knowledge of the practical implementation of the proposed strategies with variable depth of cut to streamline production. Strategies with variable depth of cut has a beneficial effect on the size the cutting forces and cutting forces and their amplitude.

Main advantages of using a variable depth of cut are:

- Increased tool life by $\Delta T = 2$ min (about 20%).
- Reducing the energy load of the machine.
- Reducing the cutting forces during tool life by up to $\Delta F_v = 658$ N, $\Delta F_v = 10.8\%$.
- Changing the relations of cutting forces components, which can signalize the end of tool life.

12.1. Contribution for practical usage

Practical applications are focused on the use of turning tools with replaceable inserts, which are made from sintered carbide in a newly designed cycle turning - a strategy with the creation of the conical surface.

The work also describes the problems of the proposed programming cycles. There are two possible ways:

- 1) Using the dialog programming directly on the machine.
- 2) With off-line programming in CAD / CAM system.

12.2. Scientific Contribution

Technological developments with the focus on turning innovation strategies is innovative only if it has a positive impact on economic costs. Economic goal is to find the solutions to increase tool life, reduce lead times, improve the quality of production and cost savings in turning operations.

LITERATURA

- [1] SVOBODA, Evžen. *Technologie a programování CNC strojů*. Havlíčkův Brod, Fragment, 1998, 100 s. ISBN 80-7200-297-X.
- [2] BEŇO, Josef. *Teoria rezania kovov*, I. vydání. Košice: Strojnická fakulta, 1999. 255 s. ISBN 80-7099-429-0.
- [3] KURIC, Ivan; KOŠTURIK Ján; JANÁČ, Alexander; PETERKA Josef; MARCINČIN Josef. *Počítačom podporované systémy v strojárstve*. Žilinská univerzita v Žilíně, 2004. 351 s. ISBN 80-7100-948-2.
- [4] SADÍLEK, M. *CAM systémy v obrábění I. - II. doplněné vydání*. VŠB – TU Ostrava, 2010, 138 s., ISBN 978-80-248-2278-4.
- [5] FOREJT, Milan; HUMÁR Anton; PÍŠKA, Miroslav; JANÍČEK, Libor. *Experimentální metody – syllabus*. Fakulta strojního inženýrství VUT – Brno.
- [6] ČEP, R. *Zkoušky nástrojů z řezné keramiky v podmínkách přerušovaného řezu*. disertační práce. Ostrava: Fakulta strojní, VŠB - Technická univerzita Ostrava, 100 stran.
- [7] VASILKO, Karol. *Technológia dokončovania povrchov*. Prešov, 2004. 116 s. ISBN 80-7073-124-1.
- [8] KOČMAN, K., PROKOP, J. *Technologie obrábění*. Akademické Nakladatelství CERM, s. r. o., Brno. 2001.
- [9] MÁDL, Jan. *Mechanical Technology Material Removal Processes*. Praha: ČVUT Praha 1996.
- [10] PRAMET Tools, s.r.o. *Průručka obrábění*, 2004, Oddělení marketingu, pracoviště DTP 12/2003.
- [11] GARANT, *Průručka pro třískové obrábění*, Hoffmann group, Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz.
- [12] PRÁŠIL, T. *Strojírenská technologie*, SEMACO tools and software s.r.o., TAWESCO s r. o., Kopřivnice.

- [13] VASILKO, K., HAVRILA, M., NOVÁK-MARCINČIN, J., MÁDL, J., ZAJAC J., Top trendy – příručka v obrábění, Technológia obrábění III. časť, Žilina. MEDIA/ST s.r.o., Žilina 2006, ISBN:80-968954-2-7.
- [14] AB Sandvik Coromant. *Hlavní katalog 2008 – soustružení, frézování, vrtání, vyvrtávání, upínání nástrojů*, Elanders, Švédsko.
- [15] PILC, J., STANČEKOVÁ, D., *Základy stavby obrábacích strojů*, Žilina: EDIS Žilina. 2004. Skripta. ISBN 80-8070-281-0.
- [16] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábění*, Žilina : EDIS Žilina. 2007, 243s. ISBN 978-80-8070-711-8.
- [17] Popis softwaru EMCO WinNC SINUMERIK 810D/840D soustružení EMCO Maier Ges.m.b.H., , ref.č. CZ 1815 vydání C2001-2, Překlad z DE 1815 Ausgabe C2001-2.
- [18] SIEMENS AG, SINUMERIK 810D/840D/840Di, SinuTrain SW5.2, Program Example: Turning a Ball Pin, 2000.
- [19] HUMÁR A. *Technologie I, Technologie obrábění – 1. část*, Studijní opory pro magisterskou formu studia, VUT Brno, 2003.
- [20] EL-HOFY, H. *Advanced Machining Processes – Nontraditional and Hybrid Machining Processes*. The McGraw-Hill Companies, 2005, ISBN 0-07-145334-2.
- [21] ABUŠINOV A. *Ohlédnutí za IMTS 2000*. [Článek VTM] Praha: VTM, 2001
- [22] FAN, X.; LOFTUS, M. The influence of cutting force on surface machining quality. *International Journal of Production Research*, Vol. 45/4/2007, p. 899-911.
- [23] SKOPEČEK T. Studium vlivu podmínek obrábění na řezné síly při frézování v režimu HSC. [Diplomová práce] Plzeň: ZČU, 2002
- [24] BURYTA, D.; SOWERBY, R.; YELLOWLEY, I. Stress distribution on the rake face during ortogonal cutting, *Journal of Mach Tools Manufact*, 1994, s. 721 – 739.
- [25] ČEP, R.; JANÁSEK A.; ČEPOVÁ, L.; PETRŮ, J.; HLAVATÝ, I.; CAR, Z.; HATALA, M. (2013) Experimental testing of cutting inserts cutting ability. *Tehnicki vjesnik/Technical Gazette*, No.1, Vol. 20, p. 21 – 26, 1/2013, ISSN: 1330-3651.
- [26] SEKIYA, K.; YAMANE, Y.; TORIMOTO, A. (2006) Tool life Detecting System. *JSME International Journal. Series C*, Vol. 49, No. 2.

- [27] ISO 3685:1993 (1993). *Tool-life testing with single-point turning tools*, Geneva, International Organization for Standardization, 48 p.
- [28] SADILEK M.; ČEP, R.; SADILKOVÁ, Z.; VALIČEK, J.; PETŘKOVSKÁ, L. (2013) Increasing tool life in turning with variable depth of cut. *Materiali in tehnologije/Materials and technology*. 2013, vol.47, no.2, pp.199-203, ISSN:1580-2949.
- [29] TOŠENOVSKÝ, J.; NOSKIEVIČOVÁ, D.. *Statistické metody pro zlepšování jakosti*. Ostrava, 2000. 362 s. ISBN 80-7225-040-X.
- [30] PAGÁČ M. – Živé ukázky obrábění sledovaly průběh řezných sil - <http://www.caxmix.cz/2015/05/25/zive-ukazky-obrabeni-sledovaly-prubeh-reznych-sil/>
- [31] ASTAKHOV V. - The assessment of cutting tool wear (2003) - Astakhov Tool Service, 3319 Fulham Dr., Rochester Hills, MI 48309, USA
- [32] KOENIG, W – KOMANDURI, R. – TONSHOFF, H.K. – ACKERSCHOTT, G.: Machining of Hard Materials, CIRP Annals 3/2/1984, p. 417-427
- [33] NESLUŠAN M. – Sústruženie kalených ocelí, Žilina : EDIS Žilina. 2009, 253s. ISBN 978-80-554-104-1.
- [34] MATSUMOTO, Y. – BARASH, M.M. – LIU, C.R: Cutting Mechanisms during Machining of Hardened Steels, Material science and technology, 1987, p. 299-305
- [35] ALMEIDA, L. a G. KUSSMAU. WALTER AG: Nové keramické VBD pro ISO S, Soustružení 5 - 10x rychleji. WALTER AG. 34 s. i-PAC 12-2.
- [36] BRYCHTA, J. et al. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB - TUO, 2007. 251 s. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [37] *Process-controls.com* [online]. 27.10.2010 [cit. 2011-01-12]. Kistler Quartz Torque Dynamometer Model 9275 . Dostupné z WWW: <http://www.process-controls.com/intertechnology/Kistler/Torque_Model_9275.htm>.
- [38] *Upc.edu* [online]. 2010 [cit. 2011-01-12]. Torque-plate. Dostupné z WWW: <<http://www.upc.edu/pct/en/equip/736/torque-plate.html>>.
- [39] LI, L.; He, N.; WANG, M.; WANG, Z.G. *High speed cutting of Inconel 718 with coated carbide and ceramic*, High speed cutting of Inconel 718 with coated carbide

- and ceramic inserts(2002) Journal of Materials Processing Technology, 129 (1-3), pp. 127-130.
- [40] Sandvik Coromant, *Příručka obrábění - kniha pro praktiky*. 1. vydání, Praha : Scienta, 1997. ISBN 91-972299-4-6.
- [41] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II : 1. díl*. 1. vydání, Ostrava : VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. 119 s. ISBN 978-80-248-1641-8.
- [42] DE VOS, P.; STAHL, J. *Obrábění kovů – Teorie v praxi*, Lund – Fagersta, Švédsko, 2014, 02987916, ST20146464 CZ, Version 1.1
- [43] ISO 3685 : 1990.Tool Life Testing With Single Point Turning Tools. 1990
- [44] http://homel.vsb.cz/~cep77/PDF/skripta_Technologie_II_1dil.pdf
- [45] KROLCZYK, G.M., NIESLONY, P., LEGUTKO, S. Determination of tool life and research wear during duplex stainless steel turning
(2015) Archives of Civil and Mechanical Engineering, 15 (2), pp. 347-354.
- [46] KOYEE, R.D., EISSELER, R., SCHMAUDER, S. Application of Taguchi coupled Fuzzy Multi Attribute Decision Making (FMADM) for optimizing surface quality in turning austenitic and duplex stainless steels(2014) Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 58, pp. 375-386.
- [47] KROLCZYK, G., NIESLONY, P., LEGUTKO, S., HLOCH, S., SAMARDZIC, I. Investigation of selected surface integrity features of duplex stainless steel (DSS) after turning (2015) Metalurgija, 54 (1), pp. 91-94.
- [48] TANG, L., HUANG, J., XIE, L., LUO, W.The influence of tool flank wear and depth of cut on temperature fields based on Johnson-Cook model in dry hard machining (2010) Proceedings - International Conference on Electrical and Control Engineering, ICECE 2010, art. no. 5630478, pp. 4820-4824.
- [49] SADÍLEK, M., KRATOCHVÍL, J., PETRŮ, J., ČEP, R., ZLÁMAL, T., STANČEKOVÁ, D.,Cutting tool wear monitoring with the use of impedance layers [Nadzor trošenja reznog alata upotrebom otpornih slojeva],(2014) Tehnicki Vjesnik, 21 (3), pp. 639-644.

-
- [50] MICHALIK, P., HATALA, M., DUPLÁK, J. Creation of programs by shop floor programming for CNC machines using cam software (2013) INES 2013 - IEEE 17th International Conference on Intelligent Engineering Systems, Proceedings, art. no. 6632822, pp. 261-264.
- [51] http://www.sandvik.coromant.com/en-us/knowledge/general_turning/how-to-achieve-good-component-quality/turning-in-different-materials/heat-resistant-super-alloys-turning/pages/default.aspx#
- [52] <http://cbnexpert.blogspot.cz/2014/10/some-basics-of-cutting-with-ceramics.html>
- [53] BRYCHTA, J.; CZÁN, A.; ČEP, R.; KRATOCHVÍL, J.; PETRŮ, J.; SADÍLEK, M.; STANČEKOVÁ, D.; ZLÁMAL, T. *Progresivní technologie v obrábění a NC programování obráběcích strojů*. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Žilinská Univerzita v Žilině, 173 s., 2014, ISBN 978–80–248–3522–8.
- [54] SONETECH s.r.o. Integrovaný programovací systém pro číslicově řízené stroje - EdgeCAM - Soustružení – EdgeCAM intelligent manufacturing. Uživatelská příručka, 80 stran, pdf dokument, 2005.

VLASTNÍ PUBLIKACE AUTORA

- I. SADÍLEK, M.; FOJTÍK, F.; SADÍLKOVÁ, Z.; KOLAŘÍK, K.; PETRŮ, J. A Study of Effects of Changing the Position of the Tool Axis to the Machined Surface, *Transaction of FAMENA*, Vol. 39, No. 2, Zagreb 2015, pp.33-46. ISSN:1333-1124. IPP (Impact per Publication) (2013) : 0.227
- II. SADÍLEK, M., SADÍLKOVÁ, Z., PAGÁČ, M. Advanced ways of creating technological progress in CAM systems, Proceedings of the seminar AMT, The 8th International Seminar on Advanced Manufacturing Technologies, 2014, Sozopol, Bulgaria.
- III. SADÍLEK, M.; ČEP, R.; SADÍLKOVÁ, Z.; VALÍČEK, J.; PETŘKOVSKÁ, L. Increasing tool life in turning with variable depth of cut. *Materiali in tehnologije/Materials and technology*. 2013, vol.47, no.2, pp.199-203, ISSN:1580-2949. **scopus**
- IV. SADÍLEK, M.; SADÍLKOVÁ Z. Počítačová podpora procesu obrábění. VŠB – TU Ostrava, 2012, 149 s., Dostupné na: <http://vyuka.fs.vsb.cz/>. ISBN 978-80-248-2770-4. Součástí této výukové podpory je 14 animací.
- V. SYSEL, P.; SADÍLEK, M.; KÚDELOVÁ, Z.; KRATOCHVÍL, J. Použití typové technologie v CAD/CAM systému EdgeCAM. *Sborník abstraktů*, Strojní fakulta, Západočeská Univerzita v Plzni Mezinárodní konference mladých výzkumníků a doktorandů. ERIN 2010. s. 75, 2010. ISBN 978-80-7043-866-4.
- VI. KRATOCHVÍL, J.; SADÍLEK, M.; KÚDELOVÁ, Z.; VRBA, V. Testing Impedance Layer on Inserts of Cutting Ceramic. *Technologické inženýrstvo – Technological engineering*. Scientific-Technical Society by University of Žilina, Vol. VI, number 2/2009, pp. 45 – 47, ISSN: 1336-5967.
- VII. KÚDELOVÁ, Z.; SADÍLEK, M.; BRYCHTA, J.; ŠTRBKA, J. Variable depth of cut during turning. *Scientific bulletin, International multidisciplinary conference*. Baia Mare, Romania, Nyiregyhádza, Hungary, 2009. p. 201-206. ISSN-1224-3264.

- VIII. KÚDELOVÁ, Z.; SADÍLEK, M.; BRYCHTA J. Proměnná hloubka řezu při soustružení. *Sborník přednášek vzdělávání, výzkum, inovace. Strojní fakulta, VŠB-TU Ostrava*, Mezinárodní konference mladých výzkumníků a doktorandů. ERIN 2009. s. 69, 2009. ISBN 978-80-248-1982-2.
- IX. KÚDELOVÁ, Z.; SADÍLEK, M.; BRYCHTA J. Aplikace proměnné hloubky řezu s využitím CAD/CAM systémů. *Progresívne metódy vo výrobných technológiach*. Medzinárodné sympóziu v rámci projektu CEEPUS CII-CZ-0201-02-0809. 2008, s. 55-58, ISBN 978-80-82276-13-4.
- X. KÚDELOVÁ, Z.; Zvyšování trvanlivosti při soustružení v podmínkách firmy John Crane Sigma, a.s., Diplomová práce v oboru strojírenská technologie, Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava, 2008, 51s.
- XI. KÚDELOVÁ Z.; Využití CAD/CAM systému při soustružení s proměnnou hloubkou řezu, Bakalářská práce v oboru strojírenská technologie, Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava, 2006, 41s.

Autorská díla vytvořená pro průmysl

Předkladatelka je autorem převážně ověřených technologií vytvořených pro praxi.

Jedná se o:

- i. SADÍLEK, M.; SADÍLKOVÁ, Z. *Nová technologie obrábění tvarových ploch s aplikací vysokorychlostního frézování. (ověřená technologie)*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, kat. 346, 2012, ev.č. 015/19-07-2012_OT.
- ii. SADÍLEK, M.; SADÍLKOVÁ, Z. *Nová technologie soustružení tenkostěnných přírub (ověřená technologie)*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, kat. 346., 2011, ev.č. 011/29-04-2011_OT.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 - Tvary třísek po daných časových intervalech

(19 573, $v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 2 \text{ mm}$ / 1,5 až 2,5 mm, $f = 0,4 \text{ mm}$)

Příloha č. 2 - Tabulka naměřených složek sil a výslednice síly řezání jednoho řezu (19 573,

$v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 2 \text{ mm}$ / 1,5 až 2,5 mm, $f = 0,4 \text{ mm}$)

Příloha č. 3 - Tabulka naměřených složek sil a výslednice síly řezání v průběhu trvanlivosti











VBD (19 573, $v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 2 \text{ mm}$ / 1,5 až 2,5 mm, $f = 0,4 \text{ mm}$)

Příloha č. 4 – Zobrazení vektoru výslednice řezání a jednotlivých složek v průběhu

trvanlivosti (19 573, $v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 2 \text{ mm}$ / 1,5 až 2,5 mm, $f = 0,4 \text{ mm}$)

Příloha č. 5 – Tabulka rozdílů velikosti složek sil (proměnná a_p - konstantní a_p)

Příloha č. 1 - Tvary třísek po daných časových intervalech (19 573, $v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 2 \text{ mm}$ / 1,5 až 2,5mm, $f = 0,4 \text{ mm}$)

Čas obrábění [min]	Konstantní hloubka řezu snímek třísky	Proměnná hloubka řezu snímek třísky
2		
3,5		
5		
6		
8		

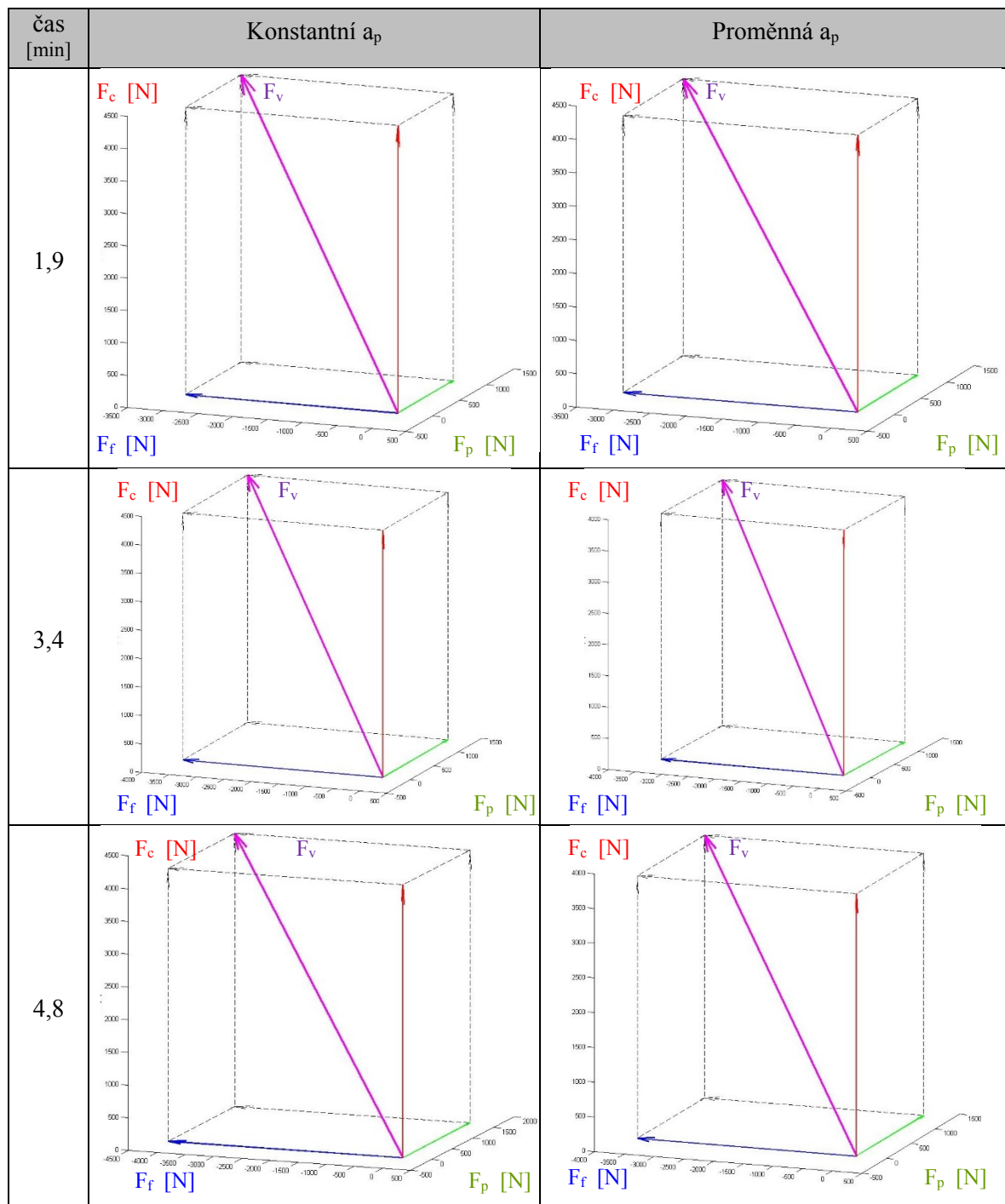
Příloha č. 2 - Tabulka naměřených složek sil a výslednice síly řezání jednoho řezu (19 573, $v_c = 230 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 2 \text{ mm} / 1,5 \text{ až } 2,5 \text{ mm}$, $f = 0,4 \text{ mm}$)

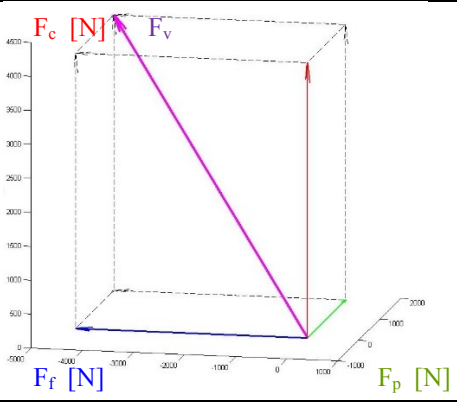
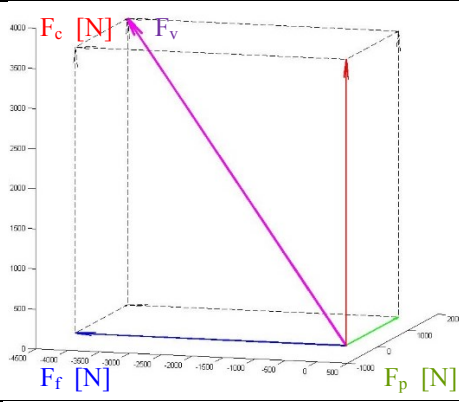
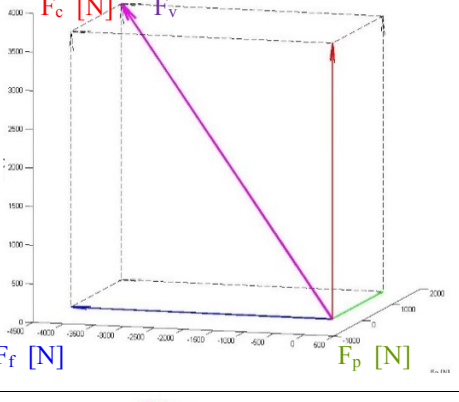
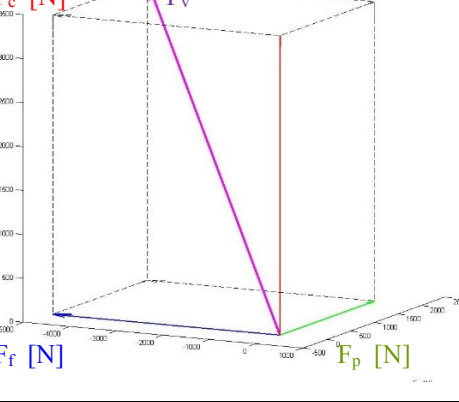
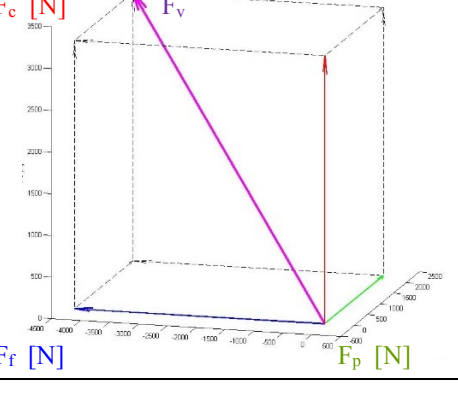
Fáze		Vzrůstající F_c	Přechodová F_c	Klesající F_c
čas	[s]	0,2 až 22,4	22,4 až 34,8	34,8 až 73,6
Průměrná F_p	[N]	1 050	1 100	1 249
$F_p \text{ min}$	[N]	424	422	473
$F_p \text{ max}$	[N]	1 668	1 821	1 908
Rozkmit F_p	[N]	1 244	1 399	1 435
Rozkmit F_p v [%] k průměrné F_p	[%]	118	127	114
Průměrná F_c	[N]	4 189	4 458	3 624
$F_c \text{ min}$	[N]	3 288	3 869	1 208
$F_c \text{ max}$	[N]	4 884	4 908	4 828
Rozkmit F_c	[N]	1 596	1 039	3 620
Rozkmit F_c v [%] k průměrné F_c	[%]	38	23	99
Průměrná F_f	[N]	2 769	3 139	3 726
$F_f \text{ min}$	[N]	2 244	2 744	2 991
$F_f \text{ max}$	[N]	3 251	3 540	4 529
Rozkmit F_f	[N]	1 007	796	1 538
Rozkmit F_f v [%] k průměrné F_f	[%]	36	25	41
F výslednice síly řezání	[N]	5 130	5 562	5 345

Příloha č. 3 - Tabulka naměřených složek sil a výslednice síly řezání v průběhu trvanlivosti VBD ($19\,573$, $v_c = 230\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, $a_p = 2\text{ mm}$ / $1,5$ až $2,5\text{ mm}$, $f = 0,4\text{ mm}$)

veličina	jednotka	strategie s konstantní a_p				strategie s proměnnou a_p							
čas	[min]	1,9	3,4	4,8	6,2	1,3	2,4	3,6	4,6	5,6	6,6	7,4	8,3
F_c	[N]	4442	4349	4167	4050	4134	3929	3934	3777	3752	3568	3406	3214
$F_c \text{ min}$	[N]	3844	3037	2408	2230	1641	1208	1224	1346	1152	1171	1075	984
$F_c \text{ max}$	[N]	4891	4948	4918	4960	4986	4908	5111	5052	4980	4980	4985	4871
Rozkmit F_c	[N]	1047	1911	2510	2730	3345	3700	3887	3706	3828	3809	3910	3887
Rozkmit F_c	[%]	24	44	60	67	81	94	99	98	102	107	115	121
F_f	[N]	3050	3679	4168	4542	3225	3366	3462	3688	4064	4347	4876	4321
$F_f \text{ min}$	[N]	2740	3219	3620	3894	2204	2244	2404	2456	3067	3011	3929	1940
$F_f \text{ max}$	[N]	3341	4196	4878	5546	4204	4529	4493	5052	5104	5445	5361	5234
Rozkmit F_f	[N]	601	977	1258	1652	2000	2285	2089	2596	2037	2434	1432	3294
Rozkmit F_f	[%]	20	27	30	36	62	68	60	70	50	56	29	76
F_p	[N]	1032	1372	1620	1829	1129	1169	1270	1372	1605	1737	2013	2239
$F_p \text{ min}$	[N]	469	697	906	1020	476	422	252	514	982	900	1279	1455
$F_p \text{ max}$	[N]	1667	2068	2505	2989	1805	1908	2079	2265	2284	2590	2767	3350
Rozkmit F_p	[N]	1198	1371	1599	1969	1329	1486	1827	1751	1302	1690	1488	1895
Rozkmit F_p	[%]	116	100	99	108	118	127	144	128	81	97	74	85
F_v	[N]	5486	5859	6112	6354	5363	5304	5392	5454	5759	5886	6279	5832
směrový úhel α_c	[°]	40	42	44	46	41	42	43	44	46	47	49	49
směrový úhel β_f	[°]	49	46	44	43	47	46	46	45	44	42	41	42
směrový úhel G_p	[°]	56	56	55	55	56	56	56	55	55	55	54	53

Příloha č. 4 – Zobrazení vektoru výslednice řezání a jednotlivých složek v průběhu trvanlivosti ($19\ 573$, $v_c = 230\ \text{m} \cdot \text{min}^{-1}$, $a_p = 2\ \text{mm}$ / $1,5$ až $2,5\ \text{mm}$, $f = 0,4\ \text{mm}$)



čas [min]	Konstantní a_p	Proměnná a_p
6,2		
6,6	-	
7,4	-	
8,3	-	

Příloha č. 5 – Tabulka rozdílu velikosti složek sil (proměnná a_p - konstantní a_p)

Rozdíl velikosti složek sil (proměnná a_p - konstantní a_p)								
Čas	Řezná složka F_c		Posuvová složka F_f		Pasivní složka F_p		Výslednice sil F_v	
[min]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]	[N]	[%]
1,9	308	6,9	-175	-5,7	-97	-9,4	123	2,2
3,4	415	9,5	217	5,9	102	7,4	467	8,0
4,8	390	9,4	480	11,5	248	15,3	658	10,8
6,2	482	11,9	195	4,3	92	5,0	468	7,4